

# Valorisation des cendres issues de la combustion de biomasse

*Revue des gisements et des procédés associés*



**VALORISATION DES CENDRES ISSUES  
DE LA COMBUSTION DE BIOMASSE**

**REVUE DES GISEMENTS ET DES PROCÉDES ASSOCIÉS**

**RAPPORT FINAL**

**février 2016**

**D. BOULDAY – CEDEN**

**F. MARCOVECCHIO – LDAR**



Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

**Avertissement :**

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :  
**RECORD**, Valorisation des cendres issues de la combustion de biomasse. Revue des gisements et des procédés associés, 2016, 91 p, n°14-0913/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)  
[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

© RECORD, 2016

## RESUME

L'étude traite de la gestion des cendres de biomasse issues d'installations industrielles et collectives (bois bûche exclus) et dresse un état de l'art, en France et en Europe, des flux, des modes de valorisation et de post-traitement, des caractéristiques physico-chimiques et des programmes en matière de nouveaux débouchés.

Actuellement, les flux de cendres de biomasse sont évalués à 200 000 t en France et 1 500 kt- 4 000 kt en Europe et devraient s'élever respectivement à 300 kt-600 kt et 2 800 kt-5 500 kt à l'horizon 2020.

La composition physique et chimique des cendres de biomasse est influencée par de très nombreux facteurs : combustible, prétraitement, post-traitement, additifs, cendres sous foyer ou volantes, puissance de l'installation, type d'équipement de combustion, mode d'extraction... Toutefois, ces cendres présentent certaines caractéristiques admises : pouvoir chaulant/neutralisant, fertilisant, comportement pouzzolanique généralement quasi nul.

En France et en Europe, une distinction est faite entre les cendres volantes et les cendres sous foyer, en général moins polluées. De nombreux facteurs limitant, différents selon les débouchés, ont été identifiés. Des solutions plus ou moins avancées visent à réduire les effets de ces facteurs préjudiciables (extinction de la chaux vive, criblage, broyage...). Actuellement, l'exutoire principal des cendres est l'enfouissement, suivi par le retour au sol (agriculture puis forêt). D'autres débouchés sont recensés dans certains pays mais concernent des flux marginaux : briqueterie, techniques routières...

Le développement de la biomasse énergie, conjugué à une réduction des possibilités d'enfouissement, a fait émerger de nombreux programmes de recherche concernant la valorisation des cendres de biomasse et notamment en France, avec certains résultats prometteurs.

Il ressort de l'étude la nécessité de consolider la filière de retour au sol, seule voie de valorisation actuellement éprouvée à grande échelle, soutenir le développement d'alternatives suffisamment crédibles, mieux caractériser les cendres et mieux les identifier, notamment en dressant une typologie plus fine des cendres pour mieux exploiter les données qualitatives et quantitatives et enfin faire évoluer le cadre réglementaire et tendre vers plus d'harmonisation en Europe pour rassurer les producteurs.

## MOTS CLES

Cendres, biomasse, bois énergie, biomasse agricole, bois, produits connexes de la transformation du bois, cendres sous foyer, cendres volantes, cendres multi-cycloniques, four à grille, four à lit fluidisé, chaufferies collectives, chaufferies industrielles, chaudières, pouvoir neutralisant, retour au sol, construction, travaux publics, traitement de déchets, cendres de charbon, cendres de boues, bois bûche.

## SUMMARY

The study deals with the management of biomass ashes from industrial and collective facilities (wood log excluded) and provides a state of the art, in France and in Europe, flows, methods of recovery and post-treatment, physico-chemical characteristics and programs for new opportunities.

Currently, flows of biomass ash are estimated at 110 kt-330 kt in France and 1 500 kt – 4 500 kt in Europe and should amount respectively 300 kt-600 kt et 2 800 kt-5 500 kt in 2020.

The physical and chemical composition of biomass ash is influenced by many factors : fuel, pretreatment, post-treatment, additives, fly and bottom ash, power installation, type of combustion equipment, extraction mode... However, these ashes have characteristics which are commonly accepted : liming / neutralizing power, fertilizer, pozzolanic behavior generally almost zero.

In France and Europe, a distinction is made between fly and bottom ash, usually less polluted. However, this separation does not always make sense according to the valuation mode, the type of equipment (including fluidized bed or grid) or mixtures of ash made in the plant (e.g. mix of bottom and coarse ash).

Currently, the main outlet is ash landfill, followed by agricultural and forestry recycling. The other identified opportunities concern a few countries and marginal flows : brickworks, road engineering...

The development of biomass energy, coupled with a reduction in landfill options, has given rise to many research and demonstration programs in recent years, particularly in France, with some promising solutions... Many limiting factors, which can be different according to opportunities, have been identified. More or less advanced solutions aimed at reducing the harmful effects of these factors (slaking lime, sorting, grinding...). However to date, the most robust and massive solution for ash recycling material remains undoubtedly the agricultural recycling.

According to the study, it's necessary to consolidate the agricultural recycling, only way to massively recycle ashes, but which remains fragile, facilitate the development of certain credible valorization methods but not enough proven, to better characterize the ash and better identify them, especially by drawing a typology for a better use of qualitative and quantitative data, and finally to develop a suitable regulatory framework and move towards more harmonization in Europe to reassure producers.

## KEYWORDS

Ash, biomass, wood energy, agricultural biomass, wood related products from wood processing, bottom ash, fly ash, coarse ash, grate furnace, fluidized bed furnace, collective boiler, industrial furnaces, boilers, neutralizing power, agricultural recycling, construction, public works, waste processing, coal ash, sludge ash, wood log.

## **SOMMAIRE**

1	Portée de l'étude .....	6
2	Définitions .....	7
2.1	Terminologie .....	7
2.2	Résidus solides de la combustion de la biomasse.....	7
2.3	Principaux équipements de combustion de la biomasse (cf. annexe) .....	8
<b>Volet 1 : Analyse du contexte réglementaire en Europe .....</b>		<b>9</b>
1	Objectif.....	9
2	Classification déchets.....	9
3	Enfouissement.....	9
4	Retour au sol.....	10
4.1	France.....	10
4.2	Europe.....	18
4.3	Québec .....	22
4.4	Synthèse .....	22
5	Matériaux pour la construction et les travaux publics.....	22
5.1	Bâtiment/matériaux.....	22
5.2	Travaux publics.....	23
5.3	Limites.....	24
<b>Volet 2 : Caractéristiques des cendres .....</b>		<b>25</b>
1	Caractéristiques .....	25
1.1	Données générales .....	25
1.2	Taux de cendres .....	25
1.3	Caractéristiques des cendres .....	26
1.4	Cendres des boues d'épuration .....	32
2	Facteurs influant sur la qualité des cendres de biomasse.....	32
2.1	Incidence du type d'intrants ou de mélange d'intrants .....	33
2.2	Incidence du type de conditionnement appliqué aux intrants .....	35
2.3	Incidence du type de traitement thermique .....	35
2.4	Incidence de l'équipement de combustion .....	35
3	Principaux effets recherchés des cendres de biomasse selon les applications .....	38
<b>Volet 3 : Evaluation des gisements et des modes de valorisation actuellement mise en œuvre 39</b>		<b>39</b>
1	Evaluation des gisements .....	39
1.1	Méthode.....	39
1.2	Focus sur deux gisements hors champ de l'étude.....	39
1.3	Gisements de cendres de biomasse issues des installations de combustion collectives et industrielles.....	40
1.4	UE .....	42
1.5	Production de cendres (sous foyers, traitement des fumées) .....	44
1.6	Synthèse .....	44
2	Etat des lieux des modes de valorisation actuels des cendres brutes ou post-traitées .....	45
2.1	Introduction .....	45
2.2	Stockage (enfouissement) .....	45
2.3	Retour au sol .....	47
2.4	Valorisation matière.....	49
2.5	Autres.....	50
<b>Volet 4 : Revue des différents procédés de post-traitement et des démarches R&amp;D en cours ou récents 51</b>		<b>51</b>
1	Retour au sol.....	51
1.1	Agriculture.....	51
1.2	Forêt.....	56
1.3	Taillis à courte ou très courte rotation .....	59
2	Valorisation matière.....	60
2.1	Types d'utilisation.....	60

2.2	Exigences techniques/critères de faisabilité.....	60
2.3	Programmes de recherche/R&D, essais, démonstration.....	62
<b>3</b>	<b>Traitement de déchets.....</b>	<b>66</b>
3.1	Stabilisation de déchets spéciaux stockés en ISDD, et principalement des mâchefers.....	66
3.2	Neutralisation de rejets aqueux acides.....	66
<b>4</b>	<b>Industrie énergie.....</b>	<b>66</b>
4.1	Applications.....	66
4.2	Programmes de recherche/R&D, essais, démonstration.....	66
<b>5</b>	<b>Combustion des cendres.....</b>	<b>67</b>
<b>6</b>	<b>Focus sur les modes de valorisation des cendres issues de l'incinération des boues.....</b>	<b>68</b>
6.1	Enfouissement.....	68
6.2	Valorisation des cendres pour leur teneur en phosphore.....	68
6.3	Utilisation en tant que matériau de recouvrement ou de revêtement dans les centres de stockage.....	68
6.4	Utilisations des cendres en tant que produits ou additifs de traitement.....	69
6.5	Valorisation des cendres en tant que matières premières secondaires.....	69
<b>7</b>	<b>Synthèse des applications et post-traitement mis en œuvre et envisageables.....</b>	<b>70</b>
<b>Volet 5 : Limites et propositions d'amélioration.....</b>		<b>71</b>
1	Limites techniques et réglementaires.....	71
2	Propositions pour favoriser le recyclage des cendres.....	72
2.1	Conforter la filière agricole pour les cendres sous foyer.....	72
2.2	Soutenir les alternatives au retour au sol les plus prometteuses.....	75
2.3	Structurer la filière et améliorer la connaissance.....	77
<b>Conclusion.....</b>		<b>79</b>
<b>Annexes.....</b>		<b>80</b>
1	Principaux contacts.....	81
2	Principaux types d'équipements de combustion pour la biomasse.....	82
2.1	Les fours à grilles mobile.....	82
2.2	Les fours à lit fluidisé.....	83
2.3	Les spreader stockers.....	83
3	Photos.....	84
4	Seuils de comportement à la lixiviation en fonction des usages en France.....	86
5	Détail des programmes principaux.....	86
5.1	BIOCOMBUST (résultats avril 2015).....	86
5.2	CERACENDRE (Résultats début 2015).....	87
5.3	PLASTICENDRE.....	88
5.4	VALOCENDRE (début du programme premier semestre 2015).....	89
5.5	UCFF/ADEME. Etude sur la valorisation des cendres de biomasse en forêt 2011-2013. (résultats mars 2014).....	90

# 1 Portée de l'étude

L'étude consiste en un état de l'art de la gestion des cendres de biomasse en Europe avec un focus sur la France.

Les cendres prises en compte dans le champ de l'étude sont des cendres de biomasse issues d'installations de combustion collectives et industrielles.

Elles se distinguent principalement par l'origine des combustibles, qui sont majoritairement des plaquettes forestières ou bocagères, des connexes de la transformation du bois, des plaquettes et des broyats issus des élagages urbains, des bois en fin de vie propres (palettes).

Dans certaines grandes installations, en particulier industrielles, les combustibles cités ci-dessus sont parfois complétés avec des bois en fin de vie adjuvés (faiblement), des sous-produits issus du process de l'industrie qui porte l'installation (liqueurs noires, boues de désencrage, résidus plastiques...). Dans ce cas, les cendres sont issues d'un mix parfois délicat à qualifier. Les cendres de boues d'épuration issues de l'assainissement collectif sont également incluses dans le champ de l'étude.

Les cendres se distinguent également par leur mode d'obtention. Les cendres sous foyers sont le cœur de cible de l'étude. Toutefois, les cendres issues des équipements de traitement des fumées (cendres fines) sont également prises en compte.

L'étude couvre également les cendres issues d'installations industrielles ou collectives aux granulés issues d'installations soumises à la réglementation ICPE : puissance thermique de 2 MW pour les chaufferies collectives biomasse et 0,1 MW pour les installations soumises à enregistrement.

Les cendres non prises en compte dans le champ de l'étude sont :

- Les cendres de charbon.
- Les cendres issues du chauffage au bois domestique.
- Les cendres d'animaux.
- Les cendres ou résidus charbonneux issues des installations de gazéification ou de pyrogazéification.

L'étude fait cependant un point sur les deux premiers gisements en France.

## 2 Définitions

### 2.1 Terminologie

Le tableau ci-après rappelle quelques définitions.

**Tableau 1 : Terminologie des cendres de biomasse**

Cendre	La cendre est un résidu principalement basique de la combustion, de l'incinération, de la pyrolyse de diverses matières organiques et minérales, et par extension de produits tels que le charbon, le lignite, le coke.. ou de divers déchets brûlés dans les incinérateurs, en plein air ou dans les cheminées ou fours	Ash	
Cendre de biomasse	Résidu principalement basique de la combustion, de l'incinération, de la pyrolyse de diverses matières organiques et minérales végétales, naturelles et non fossiles (bois, végétaux). Dans le cadre de l'étude, les cendres de boues d'épuration sont assimilées comme des cendres de biomasse.	Biomass ashes	
Cendres sous foyer issus de grilles et lits fluidisés circulants et à « bouillonnement »	Fours à grille : fraction principale pour les fours à grille (60-90 %). Lits fluidisés : production de cendres qui se composent des matériaux usagés du lit et des cendres du combustible. Les cendres sont retirées de la grille de la chambre de combustion en lit fluidisé. Elles représentent environ 10 % des cendres.	Bottom ash/coarse fly ash from (wood fired) grates, BFB or CFB	
Mâchefers	Le mâchefer est le résidu solide de la combustion du charbon ou du coke dans les fours industriels ou bien encore de celle des déchets urbains dans les usines d'incinération. Dans les centrales à charbon, les mâchefers correspondent aux cendres sous foyer des chaufferies biomasse. La production de mâchefers est liée à la présence de silice notamment, en très faibles quantités dans les cendres de biomasse.	Clinker	
Cendres volantes / Cendres fines	Fraction principale des lits fluidisés Cendres récupérées au niveau des équipements d'épuration des fumées.	Fine fly ash	
	Cendres volantes de lits fluidisés	Cendres issues des équipements d'épuration des fumées dans les installations équipées d'un lit fluidisé	Fly ash from BFB or CFB
	Cendres de multi-cyclone / Cendres grossières / Cendres volantes grossières (poussières).	Cendres issues des équipements de dépoussiérage des fumées (multi-cyclone)	Coarse fly ash (boiler fly ash, cyclone fly ash)
	Cendres de filtres à manche	Cendres issues des équipements d'épuration des fumées de type filtre à manche	Fine fly ash from baghouse filters
	Cendres d'électro-filtre	Cendres issues des équipements d'épuration des fumées de type électro-filtre	Fine fly ash from electrostatic precipitators (ESP)
Cendres humides	Cendres sous foyer extraites par voie humide. Ce système d'extraction est majoritaire parmi les chaufferies collectives d'une puissance bois supérieure à 1 MW. Ces cendres ont un taux d'humidité d'environ 15 à 25 %. Les cendres humides sont plus faciles et moins « dangereuses » à manipuler que les cendres sèches, cependant si elles durcissent spontanément il est difficile de produire un produit uniforme.		
Cendres sèches	Cendres sous foyer extraites par voie sèche. Ces cendres sont pulvérulentes, ce qui rend leur manipulation plus délicate que les cendres humides. Les cendres sèches sont faciles à traiter, mais elles sont pulvérulentes et peuvent être difficiles à manipuler : ce sont de fines particules basiques qui peuvent causer des blessures à la peau et aux yeux. Les cendres sèches contiennent généralement encore beaucoup de carbone et sont très inflammables si elles sont mal évacuées ou mal stockées.		
Foyer à grille	Ex : chaufferies collectives au bois, Ex : installations de cogénération biomasse : SAIPOL, KOGEBAN, BIOWATT...	Grate furnace	
Spreader Stoker / underfeed stoker:	Type d'équipement de combustion avec projection des combustibles. Ex chaufferie bois de Cergy Pontoise, installation CRE de Nesle.	Spreader Stoker / underfeed stoker:	
Lit fluidisé	Principalement installations industrielles et de cogénération biomasse : UPM Chapelle Darblay, GOLBEY, SMURFIT, Lens, Epinal...	Fluidized bed furnace	
Lit fluidisé circulant		Circulating fluidized bed furnace	
Lit fluidisé « bouillonnant »		Bubbling fluidized bed furnace	

### 2.2 Résidus solides de la combustion de la biomasse

Suite à la combustion du bois, une chaufferie biomasse produit des cendres (entre 0,5 et 10 % du bois entrant). Contrairement à un feu de bois domestique, des équipements récupèrent les particules entraînées par les fumées. La production de cendres est répartie à plusieurs niveaux de la chaufferie.

#### – Sous la grille

Toutes les installations produisent des cendres sous grille. Les résidus issus de la combustion tombent dans un cendrier (rempli d'eau le plus souvent en raison du caractère pulvérulent des cendres) : ce sont les **cendres sous grilles ou sous foyer**. Ces cendres représentent en général entre 70 et 90 % du total des flux de cendres dans les installations équipées d'un four à grille et plutôt 10 % dans les installations équipées d'un lit fluidisé. Dans les spreader stoker (système de combustion équipé d'un système de projection mécanique ou pneumatique des combustibles), les

cen­dres sous foyer repré­sen­tent de l'ordre de 80 % des cen­dres produites<sup>1</sup> et les cen­dres volantes moins de 20 %.

– Au niveau du cyclone

Pour traiter les fumées issues de la combustion, un dépoussiéreur (multi-cyclone) est nécessaire et suffisant sur les petites installations (inférieures à 2 MW). Cet équipement produit des **cen­dres volantes grossières** qui sont ou non mélangées directement avec les cen­dres sous foyers. Le dépoussiéreur équipe également les installations supérieures à 2 MW mais est associé en aval à un filtre à manches ou un électro-filtre : très majoritairement (95 % du parc selon la filière bois énergie) sur ces installations, les cen­dres volantes grossières sont directement évacuées dans le cendrier en mélange avec les cen­dres sous grilles, notamment pour éviter les risques d'incendie. Ces cen­dres repré­sen­tent en général entre 10 et 30 % du total des flux de cen­dres dans les installations équipées d'un four à grille.

– Au niveau des équipements de traitement des fumées

Au dessus de 2 MW (seuil ICPE), l'installation doit être équipée d'un filtre à manche ou d'un électro-filtre pour atteindre les objectifs en termes d'émissions à la sortie de la cheminée et compléter l'épuration du dépoussiéreur. Ces installations produisent donc une troisième catégorie de cen­dres, les **cen­dres volantes fines** issues de filtre à manche ou d'un électro-filtre. Ces installations produisent donc 3 types de cen­dres, mais dont 2 (cen­dres sous grilles et cen­dres grossières) sont souvent directement mélangées. Les cen­dres fines présentent en général environ 1 % du total des flux de cen­dres dans les installations équipées d'un four à grille. Contrairement aux foyers à grille, les lits fluidisés produisent principalement des cen­dres volantes.

– Autres sources de cen­dres

D'autres cen­dres peuvent être produites à différents endroits de la chaufferie : au niveau des économiseurs, des open pass, des réchauffeurs d'air...

### **2.3 Principaux équipements de combustion de la biomasse (cf. annexe)**

Les principaux équipements de combustion de la biomasse sont :

- Les fours à grilles,
- Les fours à lit fluidisé,
- Les spreader stockers.

La proportion de cen­dres sous foyer et volantes est différente selon les équipements (cf. volet 2).

---

<sup>1</sup> Kenneth W. Ragland, Kenneth M. Bryden. Combustion Engineering, Second Edition.

# Volet 1 : Analyse du contexte réglementaire en Europe

## 1 Objectif

Le premier volet de la mission consiste en une analyse du contexte réglementaire (France, UE et différents pays de l'UE) concernant le devenir des différents types de cendres de biomasse. L'augmentation des flux de cendres, conjuguée à une réduction des possibilités d'enfouissement (contraintes économiques, objectifs nationaux et européens de réduction de l'enfouissement), pousse les états européens à légiférer pour bâtir un cadre plus adapté à la leur valorisation, à travers par exemple les arrêtés du 26 août 2013 en France encadrant le retour au sol.

## 2 Classification déchets

Les cendres doivent être classées selon le catalogue européen des déchets. Les cendres issues des installations de combustion de biomasse sont classées :

- 10 01 01 Mâchefers, scories et cendres sous chaudière
- 10 01 03 Cendres volantes de tourbe et de bois non traité

Les cendres de biomasse ne sont pas considérées comme des déchets dangereux au sens de cette classification, comme les cendres volantes de charbon classées sous le code 10 01 02.

## 3 Enfouissement

La mise en décharge est possible selon les règles prévues par la décision n° 2003/33/CE du 19/12/02 établissant des critères et des procédures d'admission des déchets dans les décharges, conformément à l'article 16 et à l'annexe II de la directive 1999/31/CE.

En France, l'enfouissement des déchets est régi par :

- l'arrêté du 09/09/97 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux
- l'arrêté du 30/12/02 relatif au stockage de déchets dangereux
- l'arrêté du 28/10/2010 relatif aux installations de stockage de déchets inertes

L'enfouissement de cendres de biomasse en ISDI est interdit au regard de la liste qui fixe les déchets acceptés dans ces installations. Par ailleurs, les cendres, sous foyer ou volantes, ne respectent pas les seuils concernant le comportement à lixiviation précisés dans l'arrêté du 28/10/2010 relatif aux déchets inertes..

Les cendres de biomasse, sous foyer ou volantes, peuvent être stockées dans une installation de stockage de déchets non dangereux compte tenu de leur classification (déchets non dangereux).

On constate dans la pratique que les cendres volantes de chaudières bois sont plutôt enfouies dans des installations de stockage pour déchets dangereux : dès lors, elles doivent respecter les seuils de lixiviation imposés aux déchets dangereux (arrêté du 30/12/2002). Dans le cas contraire, elles doivent subir une stabilisation préalable, qui renchérit le coût de traitement.

Pour les installations de stockage de déchets non dangereux, une analyse du comportement à la lixiviation est nécessaire avant l'enfouissement mais il n'y a pas de seuil associé dans la réglementation française ou européenne : la décision européenne 2003/33/CE n'a pas fait l'objet d'une retranscription dans la réglementation française en ce qui concerne ces valeurs limites d'admission pour les ISDND. Dans l'attente de cette transposition, ce sont les valeurs seuils fixées dans les arrêtés préfectoraux de chaque site qui font référence. Ces valeurs limites sont généralement fournies par les exploitants de site sur simple demande. **Le texte européen sert toutefois de base de travail pour de nombreux exploitants de décharge de « classe 2 »** bien que les seuils fixés dans le règlement 2003/33/CE ne concernent que des cas très particuliers (déchets dangereux enfouis dans des ISDND ou déchets non dangereux enfouis avec des déchets dangereux).

En pratique les cendres sous foyer sont enfouies dans des installations de stockage pour déchets non dangereux.

Les valeurs pour ISDND sont donc fournies à titre indicatif car elles ne sont pas réglementaires.

**Tableau 2 : Seuils des comportements à la lixiviation pour l'enfouissement (CEDEN)**

Composant	Seuils règlement 2003/33/CE indicatifs pour ISDND	
	Déchets dangereux en ISDD	
Matière sèche en mg/kg		
As	2	25
Ba	100	300
Cd	1	5
Cr total	10	70
Cu	50	100
Hg	0,2	2
Mo	10	30
Ni	10	40
Pb	10	50
Sb	0,7	5
Se	0,5	7
Zn	50	200
Chlorures	15 000	25 000
Fluorures	150	500
Sulfates	20 000	50 000
COT sur éluat	800	1 000
Fraction soluble	60 000	100 000

Les cendres doivent être enfouies dans des installations agréées. Dans la plupart des états européens, une taxe s'applique pour l'enfouissement des déchets (TGAP en France).

Dans certains pays, les contraintes d'enfouissement favorisent les initiatives de recyclage.

Lorsque les cendres volantes sont traitées dans un ISDD, si elles ne respectent pas les seuils (c'est fréquemment le cas pour les cendres volantes d'installations équipées d'un four à grille, notamment pour la fraction soluble), une stabilisation (chaux, ciment...), réalisée sur le site de traitement, est nécessaire préalablement à l'enfouissement. La stabilisation renchérit de manière importante le cout de prise en charge (doublement du cout de traitement selon SOLICENDRE<sup>2</sup>, soit de l'ordre de 200 €/t sans stabilisation à 400 €/t avec stabilisation).

## 4 Retour au sol

### 4.1 France

#### 4.1.1 AGRICULTURE

La réglementation concerne les cendres mais également les installations qui les génèrent. En France, la réglementation encadrant les installations de combustion a récemment évolué (2013), pour affirmer plus clairement la possibilité de valoriser les cendres et préciser en particulier les conditions de retour au sol.

Les règlements concernant le retour au sol des cendres de biomasse diffèrent selon les pays. Les valeurs limites sont généralement fixées sur le contenu et la disponibilité des éléments nutritifs (N, P ou K) ou (Ca, Mg, ou S) et des teneurs maximales en métaux lourds (par exemple, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn).

Plusieurs voies sont possibles en France : la logique déchet ou la logique produit dans le cadre d'une norme ou d'une autorisation de mise sur le marché (ex homologation et autorisation provisoire de vente) : ce statut **normatif est exceptionnel** en Europe. D'autres pays préfèrent mélanger réglementairement les cendres aux composts (Allemagne).

<sup>2</sup> SOLICENDRE ISDD Argence. Communication personnelle. Janvier 2015

Le retour au sol est régi par deux logiques :

- La logique produit, qui implique la conformité à une norme ou une démarche d'autorisation de mise sur le marché,
- La logique déchet, qui nécessite une valorisation dans le cadre d'un plan d'épandage.

#### 4.1.1.1 Logique produit

Les cendres issues de la combustion peuvent être mises sur le marché en application des dispositions des articles L. 255-1 à L. 255-11 du code rural applicables aux **matières fertilisantes**. Elles disposent alors d'une autorisation de mise sur le marché ou d'une autorisation de distribution pour expérimentation, ou sont conformes à une norme d'application obligatoire.

La logique produit est possible pour l'ensemble des cendres de biomasse, y compris les cendres produites par des installations inférieures à 2 MW.

Si la cendre n'est pas normalisée ou ne dispose d'une autorisation de mise sur le marché, elle peut toutefois être épandues dans le cadre d'un plan d'épandage (régime dérogatoire du code rural). Une difficulté concerne les installations soumises au RSD car aucun cadre n'existe pour une valorisation dans une logique déchet, contrairement aux installations soumises à ICPE qui disposent d'un cadre précis rappelé dans les arrêtés du 23/08/2013.

#### 4.1.1.1.1 Normalisation des matières fertilisantes et des supports de cultures

##### 4.1.1.1.1.1 Normes engrais

Les cendres sont normalisées depuis 1981 pour 2 types d'engrais PK NF U 42 001 :

- Cendres entièrement d'origine animale (peu de volumes en France)
- Cendres entièrement d'origine végétale (la majorité en France)

Les cendres ont été confortées dans le statut engrais en 2012 avec la mise en application d'une norme 42 001 : 2011

Le tableau suivant présente l'engrais NF U 42-001 « cendres ».

**Tableau 3 : Engrais NF U 42 001 (données sur brut) (source LDAR)**

Type	Mode d'obtention	Teneurs minimales	MARQUAGE	Facultatif	Possible
Cendres végétales	Cendres de divers végétaux contenant comme composants principaux parmi diverses matières minérales, du carbonate de potassium et des phosphates	somme N P K 7 % P>2% K>5%  Avec P et K exprimés en P P205 K K2O	P dont P soluble citrate neutre K dont K eau	Ca Mg Na si >2% (exprimés en oxydes)  S si > 3%	VN (mode d'emploi)

Des teneurs maximales en éléments trace métalliques ETM ont été mises en place en 2011 pour l'ensemble des engrais 42 001.

Le tableau suivant présente les limites en ETM des engrais 42 001 VS projet CE

**Tableau 4 : Limites en ETM des engrais 42 001 (source LDAR)**

ETM	Teneurs maximales ETM Mg /kg	Teneurs maximales ETM Mg /kg commission européenne projet 2017
As	60	60
Cd	-	3
Cd	90 mg/kg P205	
Cr	120	
Pb	150	150
Hg	2	2
Ni	120	120

Très peu de cendres de biomasses respectent la norme engrais en ce qui concerne les éléments fertilisants, hormis certaines petites installations : à l'heure actuelle, ce cadre n'est pas adapté aux cendres issues de moyenne ou grandes chaufferies.

#### 4.1.1.1.2 Norme compost

##### • NF U44 051

Depuis 2010, la norme NF U44 051 « amendements organiques » exclut explicitement l'incorporation de cendres de biomasse non normalisées.

Depuis cette date, les plans d'épandage de cendres se sont développés en France.

**Tableau 5 : Extrait de la liste positive des matières admises dans les composts figurant de la norme NF U 44 051**

Par ailleurs, le cas des cendres de biomasse végétale sera traité séparément. Il apparaît que les cendres sont couramment utilisées comme composants d'amendements organiques pour relever les teneurs en éléments fertilisants majeurs. Elles relèvent donc de la réglementation sur les engrais et non de celle des amendements organiques. Elles ne peuvent donc pas figurer dans la liste positive de matières premières. Dans le cadre de la révision de la norme NF U42-001, il est possible de déposer auprès du BNAME un dossier pour reconsidérer les spécifications de la dénomination « cendres végétales ».

Pour les cendres ne correspondant pas aux spécifications de la norme NF U42-001, le MAP souhaite traiter le dossier à part avec les professionnels concernés.

##### • NF U44 095

La norme NF U 44 095 « compost contenant des matières d'intérêt agronomique issues du traitement des eaux » ou composts de boues, accepte dans les matières premières entrantes des « **matières exclusivement végétales** n'ayant subi que des traitements mécaniques, physiques ou **thermiques** ». Les cendres peuvent répondre à cette définition : ainsi, l'incorporation de cendres dans des composts de boues NF U44 095 est théoriquement possible. Toutefois, certaines DREAL semblent interpréter cette définition différemment et interdisent cette pratique, sauf si l'exploitant valorise le compost final dans le cadre d'un plan d'épandage.

#### 4.1.1.1.3 Le GT BNFERTI (source LDAR)

Le BNFERTI gère la normalisation française sur les matières fertilisantes et supports de culture (MFSC) en France et la veille stratégique européenne sur les MFSC.

Un Groupe de Travail innovant a été créé fin 2012 sur le thème des cendres : le GT CENDRES.

Ce GT CENDRES du BNFERTI, rassemble les différents acteurs de la filière : producteurs d'engrais, de cendres, vendeurs, filière « Forêt et bois », utilisateurs, prescripteurs, Ministère de l'Ecologie, évaluateurs, filières gestion des déchets.

Animé par RITMO et LDAR puis LDAR, le GT CENDRE devrait produire une norme « Cendres » en 2016-2017.

Les modifications principales attendues sont la mise en place :

- d'une méthode d'extraction supplémentaire pour le Phosphore (P citrique, un acide organique plus représentatif que le phosphore soluble dans le citrate neutre à des pH supérieurs à 10).
- Un marquage obligatoire de la VN Valeur Neutralisante.

Ce GT a constitué une première Base de données nouvelle sur les cendres dont les conclusions sont :

- le potassium, le magnésium et le soufre sont assez solubles dans l'eau. Le phosphore est globalement soluble dans l'acide citrique, paramètre de scories potassiques, autre matière fertilisante basique très proche de la matrice des cendres

A ce jour, à la vue des paramètres concernant P K Valeur Neutralisante VN, il est prévu d'ajouter des paramètres d'étiquetage P citrique et VN aux possibilités d'étiquetage des cendres engrais.

Le GT CENDRES a délégué les actions sur les qualités basiques des cendres **au GT AMB en 2015** notamment pour la gestion des actions pour les actions européennes sur les cendres (voir Harmonisation).

Le GT CENDRES souhaite la diminution des minima PK pour un minima P K Mg S Na pour prendre en compte la **carbonatation induite par l'extraction des cendres par voie flux « humide »**, qui entraîne une « dilution » des éléments (1 CaCO<sub>3</sub> = 2 CaO en masse). Une demande d'abaissement des taux est en cours d'élaboration.

La norme NF U 42 001 pourrait donc évoluer dès 2016-2017 pour préciser les conditions d'incorporation des cendres.

Les normes NF U 44 203 et 44 001 (amendements basiques avec ou sans engrais) pourraient évoluer à l'horizon 2016-2017 et inclure les cendres de biomasse.

Les dossiers techniques concernant les nouvelles cendres (cendres de boues, les biochar, les cendres de fientes) n'ont pas été déposés à ce jour faute de volonté de normaliser ces nouveaux produits dans ce groupe de travail.

Les cendres normalisées sont également utilisables en matières premières pour d'autres MFSC ou co-produits :

- Engrais Minéraux organiques et organo-minéraux 42-001.
- Amendements organiques (NF 44 051 et 95).
- Supports de cultures.
- Boues (pour structuration, fertilisation).
- Co produits (digestats, lisiers...).

#### 4.1.1.1.2 Autorisation de mise sur le marché (AMM)

Les dossiers d'autorisation de mise sur le marché permettent de mettre sur le marché des MFSC non normalisées, avec des qualités ou des effets différents de la normalisation.

Après l'étude de l'innocuité, de la stabilité de production, de l'efficacité, une autorisation de mise sur le marché ou une autorisation provisoire de vente peuvent être accordées par les experts et évaluateurs de l'ANSES.

Les dossiers sont gérés administrativement par DGAL et techniquement par ANSES

A ce jour une société belge a homologué des cendres de volailles néerlandaises en Belgique, Hollande, France et depuis une dizaine d'années en tant qu'engrais PKS Mg et amendement basique. Ces cendres servent également de matières premières pour des engrais distribués dans le Bénélux et sur des zones transfrontalières avec des autorisations belges. Les produits sont largement utilisés en agriculture dans le nord-est de la France.

Le principe de l'autorisation de mise sur le marché existe dans d'autres pays et peut être valorisé en France par reconnaissance mutuelle. Les homologations belges sont les plus efficaces pour les engrais et la reconnaissance mutuelle.

Il est important de souligner l'existence d'une forte variabilité entre les cendres. En effet, selon principalement l'origine et la nature de la biomasse et les caractéristiques de l'installation de combustion, la composition des cendres varie sensiblement. Cette propriété constitue un frein important à l'autorisation de mise sur le marché des cendres en tant que matière fertilisante.

Ainsi aucune cendre de biomasse n'est ne homologuée ou ne bénéficie d'une autorisation de mise sur le marché en France. Toutefois, cette solution pourrait être intéressante pour des installations de grande taille produisant des flux de cendres importants (plusieurs milliers de tonnes) et avec une faible variabilité dans la composition.

Une papèterie Française a conduit ces 3 dernières années une étude pour « homologuer » une partie des cendres produites sur son site, mais, au regard de la complexité des démarches, a abandonné cette solution.

**Tableau 6 : Valeurs limites en métaux dans les produits homologués (guide homologation – Ex AMM)**

Cd	2 mg/kg MS
Cr	150 mg/kg MS
Cu	100 mg/kg MS
Hg	1 mg/kg MS
Ni	50 mg/kg MS
Pb	100 mg/kg MS
Zn	300 mg/kg MS

#### 4.1.1.2 Logique déchets

En France, les arrêtés encadrant les installations de combustion (hors incinération) soumises à ICPE :

- précisent si les cendres peuvent être valorisées,
- fixent les conditions de retour au sol des cendres.

#### 4.1.1.2.1 Cendres produites par des installations d'une puissance supérieure à 2 MW de puissance totale (puissance bois et puissance de secours éventuelle) et inférieure à 20 MW

Les cendres des installations de combustion de biomasse peuvent être épandues en agriculture depuis la publication de l'arrêté du 26 août 2013. Avant ce nouvel arrêté, l'épandage était interdit du point de point de l'ancien arrêté mais possible dans le cadre d'une dérogation préfectorale (Code l'environnement).

Pour les installations soumises à **déclaration ou enregistrement**, seules les cendres issues de la combustion de biomasse par voie sèche ou humide sous l'équipement de combustion sont concernées. Or, sur la plupart des installations de combustion de puissance supérieure à 2 MW, les cendres grossières issues des dépoussiéreurs sont mélangées aux cendres sous foyer.

- **Remarque concernant l'arrêté « enregistrement »**

L'arrêté enregistrement fixe des seuils limites dans les cendres volantes : il s'agit d'un garde-fou pour garantir une bonne qualité d'approvisionnement. Il est regrettable que l'indicateur porte sur les cendres volantes : en effet, plus le traitement des fumées sera efficace, plus les cendres seront polluées. Ces cendres très chargées ne traduiront pas pour autant une mauvaise qualité d'approvisionnement en combustibles. La qualité des cendres sous foyer aurait probablement été un meilleur indicateur de la qualité de l'approvisionnement.

#### 4.1.1.2.2 Autorisation

Pour les installations soumises à autorisation (puissance supérieure à 20 MW), l'épandage des cendres est autorisé sans réelles précisions sur les cendres concernées.

La position du Ministère de l'Environnement précise à ce sujet est la suivante :

*« L'arrêté préfectoral peut autoriser la valorisation des cendres dans le cadre d'un plan d'épandage qui respecte l'ensemble des dispositions du chapitre V section IV de l'arrêté du 2 février 1998 modifié relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour l'environnement soumises à autorisation.*

*Compte tenu de la rédaction de l'arrêté du 26 août 2013, les « cendres » désignent les cendres sous foyer ce qui exclut les poussières récupérées en sortie des installations de dépoussiérage que ce soit des cyclones, des électrofiltres, filtres à manches ou d'autres systèmes de dépoussiérage, désignées comme « résidus d'épuration des fumées ».*

*En tout état de cause, les cendres récupérées en sortie des installations de dépoussiérage que ce soit des cyclones, des électrofiltres, filtres à manches ou d'autres systèmes de dépoussiérage **ne peuvent être épandues en mélange avec des cendres sous foyer sur la base de résultats d'analyse du mélange** ».*

**Remarque** : on peut souligner que l'arrêté ne distingue pas les cendres volantes issues de fours à grilles des cendres volantes issues de lits fluidisés : or leur composition est différente (cf. paragraphe sur les caractéristiques des cendres).

- **Position du CIBE**

Le comité interprofessionnel du bois énergie (CIBE) a rédigé une note en juillet 2014<sup>3</sup>. Le CIBE écrit : « Cependant, l'expression « sous l'équipement de combustion » n'est pas définie dans l'Arrêté Déclaration, ni dans l'Arrêté Enregistrement, et sa compréhension est sujette à interprétation. Il nous paraît nécessaire de clarifier cette expression, et de l'entendre comme regroupant les cendres collectées sous foyer et sous cyclone, ce pour les raisons exposées ci-après. »

En effet, la séparation de ces deux types de cendres est contraignante à plusieurs titres :

- En première approche, la séparation n'est pas effective sur 90 % du parc actuel,
- Nécessité de séparer physiquement ces deux cendres sur l'installation (surcoûts).
- L'intérêt du mélange permet en particulier l'extinction des cendres grossières (400 °C) dès lors qu'elles sont mélangées aux cendres sous foyer souvent récupérées par voie humide.
- Nécessité de trouver une alternative en cas d'épandage. De fait, au moins dans un premier temps, ces cendres qui représentent entre 10 et 30 % des flux de cendres totales, devront être évacuées en ISDND, voire ISDD en fonction des résultats des tests de comportement à la lixiviation.

<sup>3</sup> Fiches d'interprétation des arrêtés du 26 août 2013 et du 24 septembre 2013 relatifs aux installations de combustion relevant de la rubrique n°2910 Demande de révision de la notion de cendres sous équipement de combustion.

Le risque est grand également que les exploitants évacuent l'intégralité des cendres en enfouissement compte tenu des contraintes trop fortes qu'implique la nouvelle réglementation. Ainsi, plusieurs milliers de tonnes d'engrais du commerce et de chaux, dont la production est très énergivore et génératrice de gaz à effets de serre, jusqu'alors substitués par les cendres, devraient être épandus en agriculture.

Par ailleurs, l'exclusion des cendres grossières, riches en éléments fertilisants, réduit les quantités d'engrais du commerce substituées.

En 2015, le CIBE, au travers son groupe de travail « cendres », travaille sur qualité des cendres sous foyer, en mélange ou non avec des cendres issues du dépoussiérage (multi-cyclone en général) afin de vérifier que le mélange de cendres sous grille avec des cendres grossières issues du dépoussiéreur, est compatible, voire souhaité d'un point de vue agronomique (apport d'éléments fertilisants par les cendres grossières), avec le retour au sol.

Le chapitre consacré aux caractéristiques de cendres apporte des informations sur la qualité des différents types de cendres.

- **Position du ministère de l'environnement**

Suite aux nombreuses questions provenant des inspecteurs mais aussi des exploitants sur les arrêtés relatifs aux installations de combustion, le bureau de la qualité de l'air a compilé un ensemble des questions et réponses dans des fiches techniques validées au sein de la DGPR et de la DGEC (version du 16 avril 2015)<sup>4</sup>.

Selon le Ministère, **ces fiches sont fournies à titre indicatif et n'ont pas de valeur réglementaire.**

La fiche 7 concernant les cendres précise :

*« En l'état actuel des connaissances, l'épandage est limité aux cendres sous foyer, ce qui exclut les poussières récupérées en sortie des installations de dépoussiérage que ce soit des cyclones, des électrofiltres, filtres à manches ou d'autres systèmes de dépoussiérage.*

*L'épandage des cendres d'une installation à déclaration doit être circonscrit aux cendres sous foyer. Les cendres volantes, potentiellement plus chargées en Eléments Traces Métalliques, sont à exclusion de ce mode de valorisation ou nécessitent alors un suivi plus fin de leur composition.*

*L'épandage d'un mélange de cendres sous-foyer et poussières sous-cyclone ne peut se faire sur la base de résultats d'analyses chimiques du mélange de ces cendres ; ceci est contraire au principe de la collecte séparée des déchets et cette pratique peut générer des risques notamment liés au fait que les Eléments Traces Métalliques sont des polluants de type accumulatif. »*

Ainsi, le mélange n'est pas proscrit dès lors que la qualité de chacune des cendres a été démontrée.

#### 4.1.1.2.3 Point sur le traitement des déchets bois

Soulignons par ailleurs que les installations classées dans la rubrique 2910-B-enregistrement peuvent traiter des déchets de bois non traités dès lors qu'ils respectent les valeurs suivantes.

**Tableau 7 : Valeurs maximales autorisées pour les déchets répondant au b (v) de la définition de biomasse (arrêté du 24/09/13)**

Composé	Teneurs maximales (en mg/kg de matière sèche)
Mercure, Hg	0,2
Arsenic, As	4
Cadmium, Cd	5
Chrome, Cr	30
Cuivre, Cu	30
Plomb, Pb	50
Zinc, Zn	200
Chlore, Cl	900
PCP	3
PCB	2

<sup>4</sup> <http://www.installationsclassees.developpement-durable.gouv.fr/Installations-de-combustion.html>

Ces seuils sont très contraignants et ont été retenus sur la base des compositions de la biomasse naturelle (plaquettes forestières) : seuls les bois d'emballage non souillés (en particulier les palettes) peuvent les respecter. La qualité des cendres n'est donc pas dégradée par le traitement de ces déchets de bois.

- **Sortie du statut de déchet**

De plus, toujours dans le but d'améliorer la qualité des combustibles brûlés en chaufferie, et donc la qualité des émissions et des cendres, la réglementation impose depuis 2013 des valeurs limites pour les déchets de bois traités dans les installations de combustion (cf. arrêté du 24/09/2013 - régime 2910B enregistrement). Par ailleurs, elle permet la sortie du statut de déchets les déchets de bois (emballages) dès lors qu'ils respectent les seuils de l'arrêté du 29 juillet 2014 (Arrêté du 29 juillet 2014 fixant les critères de sortie du statut de déchet pour les broyats d'emballages en bois pour un usage comme combustibles de type biomasse dans une installation de combustion). Les paramètres retenus et les valeurs limites sont identiques à celles qui ont été fixées dans l'arrêté du 24/09/2013 encadrant les installations classées 2910B-enregistrement. Cette réglementation permet aux exploitants de continuer à brûler des bois d'emballage dans les installations classées 2910A soumises à déclaration, dans lesquelles seule la biomasse et les combustibles bois sortis du statut de déchet peuvent être valorisés.

#### 4.1.1.3 Regroupement et stockage des cendres

Les cendres peuvent être stockées et regroupées (plusieurs installations de combustion) sur une plateforme couverte ou avec récupération des lixiviats. La plateforme doit être déclarée ou autorisée, selon les cas de figure, selon la rubrique ICPE 2716 ou 2791<sup>5</sup>. En Normandie, 3 plans d'épandage sont adossés chacun à une plateforme rangée sous les rubriques ICPE 2716 et 2791 et soumise à déclaration. Chaque plateforme de regroupement accueille les cendres de plusieurs chaufferies, autorisées ou déclarées. Les plateformes étant soumises à déclaration compte tenu des flux de cendres regroupés, les plans d'épandage sont donc soumis à déclaration.

#### 4.1.1.4 Focus sur la réglementation encadrant le retour au sol des cendres issues d'installations non soumises à la réglementation ICPE

Les cendres issues des chaufferies soumises au Règlement sanitaire départemental (RSD) fixent les conditions d'épandage. Selon ces articles, les cendres issues de ces installations doivent être considérées comme des matières fertilisantes et peuvent être valorisées dans le cadre d'une autorisation de mise sur le marché (ou norme). Ces démarches sont peu ou pas adaptées à ces flux modestes, voire très aléatoires pour ce qui concerne la norme concernée (NF U 42 001). Le code rural permet de déroger à cette logique produit si un plan d'épandage est mis en place.

Le plan d'élimination des déchets fixe dans certains départements des prescriptions spécifiques à prendre en compte.

Enfin, les flux étant diffus et très modestes (quelques tonnes par an) et en général de bonne qualité (l'approvisionnement des petites chaufferies est de très bonne qualité), il est souhaitable que le bon sens l'emporte pour éviter comme c'est souvent le cas d'évacuer ces cendres en installations de stockage.

---

<sup>5</sup> Circulaire du MEDD d'avril 2012. Cendres de chaufferie à biomasse : quelques rappels de la réglementation sur le statut des cendres et sur celui des installations.

**Tableau 8 : Conditions de valorisation en agriculture des cendres de biomasse issues d'installations soumises à la réglementation ICPE**

Type d'installations	RSD	Réglementation ICPE		
		> 0,1 MW et < 20 MW. 2910 B	> 2 MW 2910 A (déclaration)	> 20 MW 2910 A (autorisation)
	< 2 MW	Arrêté du 24/09/13	Arrêté du 26/08/13	Arrêté du 26/08/13
Usages	Particuliers, agriculteurs, petites installations collectives ou en industrie	Chaufferies collectives ou industrielles	Chaufferies collectives ou industrielles brûlant de la biomasse uniquement	Chaufferies collectives ou industrielles
Valorisation des cendres	Oui.	Oui. L'exploitant effectue à l'intérieur de son établissement la séparation des déchets (dangereux ou non) de façon à faciliter leur valorisation ou leur élimination dans des filières spécifiques.	Oui. Les diverses catégories de déchets sont collectées séparément puis valorisées ou éliminées dans des installations appropriées.	Oui. Les sous-produits et déchets issus de la combustion (cendres, mâchefers, résidus d'épuration des fumées...) sont, lorsque la possibilité technique existe, valorisés, en tenant compte de leurs caractéristiques et des possibilités du marché ( <b>ciment, béton, travaux routiers, comblement, remblai...</b> ).  Les sous-produits et déchets issus de la combustion (cendres volantes, cendres de foyer, gypses de désulfuration, mâchefers, résidus d'épuration des fumées, etc.) sont comptabilisés et stockés séparément.
Valorisation en agriculture	Oui. Logique produit (norme ou AMM) uniquement. En théorie, sans démonstration du respect d'une norme ou en l'absence de démarche d'AMM, ces cendres doivent être évacuées avec les déchets ménagers pour les particuliers voire directement en ISDND pour les collectivités et les entreprises.	Oui. Uniquement les cendres sous l'équipement de combustion dans la limite d'un volume annuel de 5 000 tonnes/an.	Oui : Les cendres <b>issues de la combustion de biomasse par voie sèche ou humide sous l'équipement de combustion</b> peuvent être épandues, dans la limite d'un volume annuel de 5 000 tonnes/an. L'épandage de tout autre déchet, des eaux résiduaires et des boues est interdit.  Plan d'épandage (arrêté ICPE 2910) ou logique produit :	Oui : L'arrêté autorise « l'épandage des cendres », sans autres précisions mais on peut interpréter par « cendres sous foyer ».  Plan d'épandage (arrêté ICPE 2910) ou logique produit : les cendres peuvent être mises sur le marché en application des dispositions des articles L. 255-1 à L. 255-11 du code rural applicables aux matières fertilisantes ; elles disposent alors d'une AMM, d'une autorisation provisoire de vente ou d'une autorisation de distribution pour expérimentation, ou sont conformes à une norme d'application obligatoire.

#### 4.1.2 UTILISATION EN FORET

Il existe une incohérence entre les arrêtés déclaration/enregistrement et autorisation ICPE : Les premiers ouvrent la possibilité à des épandages en forêts « exploitées », l'autre maintenant l'interdiction pour les forêts puisque renvoyant aux articles L. 255-1 à L. 255-11 du code rural qui porte sur l'épandage sur sols agricoles uniquement.

A titre de comparaison, l'interdiction d'épandage de boues en forêt repose sur l'article L.255-2 (sauf dans un cadre expérimental avec une autorisation préalable : article de l'arrêté du 2 février 1998).

Le bon sens voudrait que dès lors que l'épandage est explicitement autorisé pour les installations soumises à déclaration et enregistrement, il le soit également pour les installations soumises à autorisation. Toutefois, l'expérience montre que ce type d'ambiguïté freine souvent les initiatives.

Les modalités d'épandages de cendres en forêt pour les ICPE soumises à déclaration et à enregistrement ont été définies à partir du texte relatif à l'épandage des déchets sur sols agricoles. Celles-ci ne sont pas toujours adaptées au contexte forestier et pourraient se révéler difficiles à respecter dans certains cas.

Il paraît essentiel de créer parallèlement un nouveau projet d'arrêté pour les installations soumises à autorisation, qui encadrerait spécifiquement l'épandage des cendres en forêt. Cela permettrait de clarifier les choses et d'être cohérent avec l'arrêté du 26 août 2013 relatif aux installations soumises à déclaration.

Selon l'étude réalisée par l'ADEME (Etude sur la valorisation des cendres de biomasse en forêt 2011-2013), une autre solution pour pouvoir épandre en forêt tout en respectant la loi sur les épandages sur les sols agricoles, serait d'assimiler un sol forestier à un sol agricole. Aujourd'hui, aucun texte législatif ou réglementaire ne donne de définition juridique de la forêt et encore moins d'un sol forestier.

**Tableau 9 : Valeurs limites en éléments-traces métalliques dans différents pays européens**  
(sources CEDEN, KEMA)

Eléments traces métalliques	France	Autriche	Allemagne	Danemark	Suède	Finlande
	Valeurs limites agriculture et forêt	Valeurs limites agriculture et forêt	Valeurs limites agriculture uniquement	Valeurs limites forêt uniquement		
As		20/20	40		30	40
B					800	
Cd	2	5/8	2	5/20	30	25
Cr	150	150/150	2	100	100	300
Cu	100	200/250			400	700
Hg	1		1	0,8	3	1
Ni	50	150/200	80	60	70	150
Pb	100	100/200	150	250	300	150
Ti			1			
V					70	
Zn	300	1 200/1 500			7 000	4 500

## 4.2 Europe

### 4.2.1 REGLEMENT 2003/2003 (SOURCE LDAR)

L'harmonisation 2003/2003 est un projet de réforme réglementaire pour ajouter au règlement 2003/2003 sur les engrais minéraux :

- des nouveaux produits organiques (engrais, amendements, supports de culture)
- des nouveaux produits minéraux (cendres, amendements sidérurgique)

Cette harmonisation permettra d'avoir une même réglementation transfrontalière et européenne sur les cendres et autres co-produits valorisables en Agriculture.

Ceci devrait se mettre en place à minima en **2017-2020**.

**Le WG 3 du TC 260 géré principalement par les allemands et les français fournira les données minimales pour les qualités requises pour des cendres.**

A moyen terme cette réglementation pourra être substituée à l'ensemble des normes nationales sur les fertilisants (en France/ 42-001-2 3 44-051 44-001 44-551....).

Cette réglementation pourrait supplanter la réglementation française pour les produits décrits dans la réglementation européenne.

Les cendres seraient prises en compte avec un cahier des charges commun aux autres produits pour les ETM.

#### 4.2.2 ISO (SOURCE LDAR)

L'International Standardization Organisation (ISO TC 134) travaille à partir de 2015 sur les **amendements basiques dont les cendres** avec un groupe de travail géré principalement par **AFNOR BNFERTI**.

On peut imaginer une valorisation des cendres dès 2016 au sein de cette organisation.

Ces normes seront certainement identiques aux normes CE 2003/2003. Il est trop tôt pour connaître l'imbrication avec les normes françaises amendements basiques.

Les normes européennes et ISO remplaceront à court terme l'ensemble des produits équivalents dans les 3 réglementations.

#### 4.2.3 PROJET END OF WASTE « JRC »

La démarche de sortie du statut des déchets des composts initiée par le Joint Research Centre de Séville en 2009 autorise l'incorporation de cendres de biomasse dans les composts.

Cette réglementation dite « end of waste » qui pourrait s'appliquer à tous les composts en Europe autorise l'incorporation de cendres sous foyer à hauteur de 15 % de la matière brute (avec maintien du statut de produit), en opposition avec la réglementation française qui exclut formellement les cendres de la liste positif de la norme NF U 44 051. Toutefois, cette démarche est actuellement en stand by.

**Tableau 10 : Extrait de la liste positive des matières admises dans les composts figurant dans le document de travail du JRC pour la sortie de statut de déchets des composts**

4	Additives for composting [added in minor quantities (up to 15% of the composting feedstock, expressed in fresh weight) in order to improve the composting process, humification and maturation or environmental performance of the process]			
4.01	Rock dust		01 03 08 01 04 09	Dusty and powdery waste except those belonging to 01 03 07 Waste from sand and clay
4.02	Lime stone dust		02 04 02	Calcium carbonate sludge not according to specification
4.03	Bentonite			
4.04	Ash from combustion of plant tissue (e.g. wood, straw)	No fly and filter ash, non contaminated bottom ash only	10 01 01	Bottom ash, slag and boiler dust (excluding boiler dust mentioned in 10 01 04)
4.05	Excavated soil	Not contaminated	17 05 04 17 05 06	Soil and stones other than those mentioned in 17 05 03

#### 4.2.4 ALLEMAGNE

L'Allemagne dispose de textes réglementaires (Düngemittelverordnung) permettant l'utilisation de co-produits dont les cendres dans la fabrication des engrais ou des composts. Les cendres peuvent être mélangées avec des engrais minéraux.

L'intérêt de ce type de mélange est principalement l'enrichissement en potassium des composts, l'hygiénisation des composts. Les conditions sont différentes selon les types d'engrais et des valeurs limites sont fixées pour les métaux lourds.

- Engrais K : > 10 % de K<sub>2</sub>O,
- Ca - engrais : > 15 % de CaO ,
- Engrais PK : > 2 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et 3 % K<sub>2</sub>O
- Engrais NPK : > 3 % de N, 2 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et 3% K<sub>2</sub>O.

La **certification privée RAL** permet une plus-value pour la valorisation des cendres, principalement par ajout aux composts. Une application en mélange avec un engrais calcaire (<30 % de cendres) est possible.

Seules les cendres sous foyer peuvent être utilisées comme engrais

#### 4.2.5 ITALIE

Les cendres résultant de la combustion de la biomasse sont classées comme "déchets non dangereux" dans le cadre du décret-loi. 152/2006 (partie IV). Cette règle établit diverses possibilités

de recyclage des «cendres provenant de la combustion de la biomasse et connexes» avec des procédures simplifiées impliquant en particulier la valorisation matière (béton) et le retour au sol (production de compost et d'engrais).

Il est rappelé que le règlement CE 2092/1991 permet l'utilisation en agriculture biologique de «cendre de bois" comme engrais.

#### 4.2.6 WALLONIE

La Wallonie dispose d'une réglementation « déchets » incluant les cendres.

Par décision du Comité engrais du 09/12/2008, la valorisation des cendres de bois en agriculture n'est pas autorisée. L'introduction des cendres de bois dans le processus de production d'un compost ou dans le processus de production d'un engrais ou amendement agréé par le fédéral n'est pas autorisée (source Direction générale de l'agriculture wallonne). Mais, la position du Comité Engrais, dont la position est évolutive, ouvre la possibilité de valoriser des cendres de bois de bonne qualité en agriculture dans les conditions suivantes :

- Traitement des demandes au cas par cas (variabilité)
- Co-décision SPF/DSD : demande à introduire au SPF/DSD
- Cendres sous foyer issues de bois non traités
- Pas de valorisation directe
- Introduction dans les installations de production d'engrais NPK
- Introduction en installation de compostage :
  - enrichissement du compost
  - source MO
- Conformité avec le permis de l'installation compostage/production d'engrais
- Valeurs limites en ETM sur les cendres
- Teneurs minimales P, K, MO, finesse des cendres
- Taux maximal d'incorporation
- Analyse préalable par lot
- Valeurs limites polluants sur la matière produite

Au niveau juridique, la valorisation des cendres peut s'envisager :

- Sur base de l'AGW du 14 juin 2001 favorisant la valorisation de certains déchets - article 13 enregistrement & certificat d'utilisation
- Par l'introduction dans une installation autorisée, couverte par un permis autorisant l'acceptation de ce type de déchet : critères d'acceptation définis dans le permis.

Si l'utilisation en tant qu'engrais/amendement est envisagée, il faut se référer à l'AR du 28 janvier 2013 relatif à la mise sur le marché et à l'utilisation des engrais, des amendements du sol et des substrats de culture d'application.

La Wallonie distingue deux classes pour les matières recyclables.

**Tableau 11 : Valeurs limites de concentration en éléments traces métalliques autorisés dans les matières recyclables de classe A et B (source Direction de l'agriculture Walonne)**

CLASSE	A		B	
SOUS-CLASSE		B1	B2	
<b>Éléments traces métalliques</b>	Valeurs limites (mg/kg MS)			
Cadmium (Cd)	0,75	1,5	(10) 5	
Chrome (Cr)	50	100	500	
Cuivre (Cu)	35	100	600	
Cobalt (Co)	20	-	-	
Mercure (Hg)	0,25	1	(10) 5	
Molybdène (Mo)	2,5	-	-	
Plomb (Pb)	70	100	500	
Nickel (Ni)	25	50	100	
Zinc (Zn)	150	400	2000	

Les cendres conviennent principalement à la classe B2 qui correspond aux boues d'épuration.

Un travail de recherche important est en cours pour valider les possibilités de retour au sol des cendres. Ces projets permettront une valorisation plus importante des cendres en Agriculture, à la fois en tant qu'engrais et en tant que matières premières par ajout à des digestats ou à des lisiers.

L'intérêt de ce type de mélange est un enrichissement en potassium et calcium des digestats mais aussi une hygiénisation des lisiers.

Le pôle de compétitivité GREENWIN prendra en charge la coordination des projets en découlant. [www.greenwin.be](http://www.greenwin.be).

#### **4.2.7 AUTRICHE**

En Autriche notamment, il existe une **directive** pour l'utilisation des cendres de biomasse sur des sols **agricoles et forestiers**.

Les cendres peuvent être mélangées avec de la matière organique (compost, fumier, fientes de volailles).

Les textes restent peu directifs mais constituent un cadre pour les producteurs, les utilisateurs et les pouvoirs publics pour le retour au sol.

Les contraintes concernent principalement certains métaux lourds et des composés organiques, des apports limités à l'hectare, et la qualité des cendres en fonction de l'usage (agriculture ou forêt). Par ailleurs, des recommandations sont apportées pour leur application sur sols agricoles ou forestiers.

La réglementation distingue deux qualités au travers de deux classes, A et B, avec des contraintes d'épandage plus fortes pour la classe B.

L'ordonnance « compost » qui concerne notamment les déchets organiques permet l'incorporation des cendres dans les composts à hauteur de 2% du poids brut.

#### **4.2.8 SUEDE**

Les cendres de biomasse propres peuvent être valorisées en agriculture ou en forêt.

Les cendres peuvent être mélangées avec de la matière organique (compost, fumier, fientes de volailles).

L'Agence suédoise des forêts recommande des niveaux minimum et maximum de substances dans les cendres.

On note des épandages de cendres humidifiées avec de l'eau ou des boues industrielles pour une valorisation en forêt.

#### **4.2.9 FINLANDE**

En Finlande, le décret du ministère de l'Agriculture et des forêts sur les produits fertilisants entré en vigueur en 2011 permet l'utilisation des cendres de bois, de tourbe et de biomasse agricole comme engrais en agriculture, horticulture, aménagement paysager (cendres « agricoles ») et dans le secteur forestier (cendres « de forêt »).

Selon le type de cendres, le texte fixe des valeurs minimales relatives au contenu des éléments nutritifs et des valeurs limites l'arsenic et le cadmium. L'ajout de nutriments est autorisé pour améliorer l'intérêt fertilisant des cendres.

Pour une utilisation en agriculture, horticulture et aménagement paysager, la seule valeur limite concerne la valeur neutralisante (CaO) qui doit être supérieure à 10 %.

On note comme en Suède des épandages de cendres humidifiées avec de l'eau ou des boues industrielles pour une valorisation en forêt.

#### **4.2.10 DANEMARK**

Au Danemark, l'ordonnance sur l'utilisation de cendres de biomasse à des fins agricoles a été modifiée en 2008. Ce règlement fixe notamment des limites pour les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et adapte les contraintes en fonction de l'origine des cendres et de l'usage (paille, bois, utilisation en forêt).

#### **4.2.11 PAYS-BAS**

Aux Pays-Bas, il n'y a pas de réglementation spécifique pour l'utilisation des cendres de biomasse ou de bois dans le secteur forestier. Par défaut, cette solution est donc interdite.

#### **4.2.12 ESPAGNE**

Les cendres, doivent se gérer en fonction des principes de base de la gestion des déchets établis par la législation européenne (Directive 98/2008/CE) et espagnole (Loi 22/2011 du 28 juillet sur les résidus et les sols pollués). Ces cendres sont éliminées actuellement dans des décharges, ou bien utilisées en agriculture. Toutefois, l'augmentation de leur production rend nécessaire de chercher d'autres alternatives, parmi lesquelles leur application dans le secteur du bâtiment.

### 4.3 Québec

Le Québec travaille sur un gisement de 300 000 t par an de cendres de bois.

La majorité de ces cendres (souvent de l'industrie du bois) est valorisée en amendement engrais.

La norme BNQ 0419-090 permet la valorisation avec des indicateurs innovants :

- Pouvoir neutralisant (PN)  $> 25\%$  \*équivalent de notre Valeur neutralisante
- des granulométries maximales
- des ratio minimaux (Ca+Mg/(Na+K), (PN/chaque ETM)
- ratios maximaux PN/Na
- formaldéhydes/dioxines

Et un marquage permettant des mélanges possibles en tant que matières premières.

### 4.4 Synthèse

Les possibilités d'incorporation dans les composts concernent, quand c'est autorisé, des flux modestes (exemple 2 % en masse en Autriche). Par ailleurs, dans la très grande majorité des cas, les cendres de biomasse (bois) ne respectent aucune norme, engrais ou amendement, en vigueur.

La législation sur l'utilisation des cendres de biomasse est encore lacunaire, en particulier pour un usage en Forêt. Par ailleurs, les cendres de biomasse ont un statut différent selon les pays.

Le cadre réglementaire est adapté surtout au retour au sol dans le cadre d'un plan d'épandage (cas de la France). Sinon, en Europe en général, le cadre normatif ou l'autorisation de mise sur le marché est peu adapté aux cendres, ce qui limite leur valorisation en agriculture. Toutefois, le cadre réglementaire et normatif est en train d'évoluer en Europe, notamment pour mieux prendre en compte les cendres de biomasse. En Allemagne et en Finlande par exemple, les exigences de la réglementation sont strictes et limitent le retour au sol à une partie seulement des cendres de biomasse.

Les incertitudes incitent très souvent les exploitants à privilégier l'enfouissement, plus onéreux que l'épandage, mais moins contraignant. Cette situation a vocation toutefois à évoluer au regard des évolutions attendues du règlement 2003-2003 sur les engrais.

## 5 Matériaux pour la construction et les travaux publics

### 5.1 Bâtiment/matériaux

#### 5.1.1 FRANCE

En France, deux voies sont employées pour incorporer des cendres dans un béton :

- Utiliser les cendres comme constituant du ciment.
  - Dans ce cas, le mélange de ciment doit alors, en France, respecter la norme NF P 15-301 de juin 1994 : Ciment courants : Composition, spécifications et critères de conformité et la norme NF EN 197-1 d'avril 2012.
- Utiliser les cendres en tant que composant supplémentaire du béton, c'est-à-dire en tant qu'additifs de type II, au sens de la norme NF EN 206-1.
  - Les cendres volantes peuvent être également intégrées en tant que granulats, dans les bétons et mortiers, et venir en substitution du ciment. Dans le cadre de cet usage, elles doivent répondre aux exigences de qualité proposées par la norme NF EN 450 – Octobre 1995 – (Classement P18-050) et son annexe nationale – « Cendres volantes pour béton – Définition, exigences et contrôle de qualité ».

Attention : bien distinguer la production de ciment (préparation d'un produit à forte valeur ajoutée dans le cadre d'un procédé complexe) et l'ajout de cendres dans les bétons (mélange rapide dans les centrales à béton).

Il existe ainsi des normes pour les cendres de charbon :

- la norme **NF EN 197** pour les ciments qui permet l'incorporation de cendres volantes siliceuses et calciques produites par les centrales à charbon.
- la norme **EN 450-1** d'octobre 2012 par exemple précise l'ensemble des exigences permettant d'évaluer la qualité des cendres volantes pour béton. Aux États-Unis, il existe une réglementation similaire, la norme ASTM (C- 618) pour l'utilisation des cendres volantes dans l'industrie du béton. Ce règlement stipule explicitement que les cendres volantes doivent être issues de charbon.

- la norme **EN 13055** spécifie les caractéristiques des granulats légers et des fillers légers élaborés à partir de matériaux naturels, artificiels ou recyclés et des mélanges de ces granulats afin d'être utilisés dans le béton, le mortier ou le coulis entrant dans la construction des bâtiments, des routes et des ouvrages de génie civil.

Ces normes ne s'appliquent toutefois pas aux cendres de biomasse. La réglementation sur les bétons s'est notamment durcie récemment et impose désormais des teneurs en alcalins maximales que les cendres de biomasse ne peuvent en général pas respecter.

Dans le cas des bétons, les cendres peuvent être utilisées en tant que charge (remplissage) ou pour améliorer la distribution granulométrique, ou la maniabilité.

### 5.1.2 EUROPE

Seules les cendres volantes de charbon sont autorisées dans les normes européennes. Seule la Suisse dispose d'un cadre permettant l'utilisation de cendres de biomasse.

## 5.2 Travaux publics

Les principales normes suivantes sont concernées :

- norme **EN 13055** granulats légers et des fillers légers élaborés à partir de matériaux naturels, artificiels ou recyclés et des mélanges de ces granulats afin d'être utilisés notamment dans des routes et des ouvrages de génie civil.
- Norme NF P15-108 Décembre 2000. Liants hydrauliques - Liants hydrauliques routiers - Composition, spécifications et critères de conformité.
- Normes NF EN 14-227 Matériaux de chaussée. La série des normes NF EN 14227 fixent les spécifications concernant les mélanges granulaires et les sols traités au ciment, au laitier, à la cendre volante, au liant hydraulique routier et à la chaux dans le domaine des chaussées.
- NF EN 459-1 Mars 2012. La présente norme européenne s'applique à la chaux de construction et intègre les cendres volantes.

### 5.2.1 FRANCE

L'arrêté du 18 novembre 2011 fixe les conditions du recyclage en technique routière des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux. Cet arrêté remplace la circulaire du 9 mai 1994 relative à l'élimination des mâchefers d'incinération des résidus urbains et redéfinit les règles de valorisation des mâchefers en technique routière. Par ailleurs, deux guides réalisés par le SETRA/CEREMA concernent directement la valorisation des déchets en techniques routières :

- Guide méthodologique : Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière- Evaluation environnementale (SETRA, Réf. 1101, mars 2011).
- Guide d'application : Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière - Les mâchefers d'incinération de déchets non dangereux (SETRA, Octobre 2012, Référence : 1221)

**Par défaut, l'utilisation de cendres de biomasse sous foyer ou volantes, doit répondre à cet arrêté et ces guides.**

Les valeurs exigées par les guides SETRA sont différentes de celles figurant dans l'arrêté du 18/11/2011. En synthèse, les exigences imposées aux MIOM dans l'arrêté du 18/11/11 se situent entre le niveau 1 (le plus exigeant) et le niveau 2 (le moins exigeant) du guide SETRA. Notons que le guide SETRA a été bâti avant l'arrêté du 18/11/11, qui a remplacé la circulaire de 1994.

Par ailleurs, les valeurs de l'arrêté du 18/11/11 se situent entre ceux exigés pour les déchets inertes enfouis en ISDI et ceux exigés pour les déchets enfouis en ISDND.

Notons que les seuils portent sur les matières entrant dans la composition du mélange final utilisé en techniques routières et non sur le mélange final, ce qui limite l'emploi de sous-produits comme les cendres.

#### Remarque

En France l'arrêté **autorisation** pour la rubrique 2910 A (installation de combustion de biomasse) précise : « Les sous-produits et déchets issus de la combustion (cendres, mâchefers, résidus d'épuration des fumées...) sont, lorsque la possibilité technique existe, valorisés, en tenant compte de leurs caractéristiques et des possibilités du marché (**ciment, béton, travaux routiers, comblement, remblai...**). En revanche, les arrêtés **déclaration** et **enregistrement** n'évoquent que le retour au sol comme possibilité de valorisation.

### 5.2.2 PAYS-BAS

Le décret national sur la qualité du sol fixe des limites pour le comportement à la lixiviation pour l'utilisation de composés inorganiques.

Un modèle (CROW) a été développé pour évaluer l'utilisation durable des matières en génie civil. Les cendres peuvent être utilisées en soubassement dans la construction.

### 5.2.3 ALLEMAGNE

L'application de cendres doit satisfaire à la réglementation « LAGA », qui concerne l'utilisation des sous-produits minéraux. Ce règlement fixe des limites pour le comportement à la lixiviation.

En Allemagne, les cendres peuvent être valorisées en soubassement dans la construction ou en aménagement de mines.

### 5.2.4 BELGIQUE

Utilisation en soubassement dans la construction.

- **Wallonie**

Tout type de cendre « non dangereuse »

Valorisation « matière » dans le **domaine routier** (routes, surfaces asphaltées ou bétonnées), en tant que remblai ou sous-fondation, envisagée dans le TFE de Mille D. LERAT, réalisé au DPC en 2012.

### 5.2.5 AUTRICHE

On relève que les cendres peuvent être utilisées comme substituant pour le sel de déneigement sur les trottoirs et petites routes, en mélange avec des plaquettes de bois (breveté).

### 5.2.6 FINLANDE

Un décret fixe les conditions de recyclage de certains déchets en travaux publics. Ce décret limite l'utilisation de cendres à certains usages : routes, trottoirs, aires de stationnement, terrain de sport, etc.).

### 5.2.7 ITALIE

Les cendres résultant de la combustion de la biomasse sont classées comme "déchets non dangereux" dans le cadre du décret-loi. 152/2006 (partie IV). Cette règle établit diverses possibilités de recyclage des «cendres provenant de la combustion de la biomasse et connexes» avec des procédures simplifiées impliquant en particulier la valorisation matière (béton) et le retour au sol (production de compost et d'engrais).

Le recyclage dans le ciment et l'industrie de la brique est précisé par le DM du 5 février 1998 permettant une procédure simplifiée (communication au lieu d'autorisation).

## 5.3 Limites

Il existe des règlements pour l'utilisation de cendres dans les bétons ou les ciments dans certains pays européens (notamment France), mais sont surtout adaptés aux cendres volantes silico-alumineuses et sulfo-calciques des centrales à charbon, les cendres de biomasse étant exclues de facto ou n'entrant pas dans les exigences de composition (notamment pouvoir pouzzolanique, hydraulique...).

Pour les ciments, aucune norme ne permet l'incorporation de cendres de biomasse en Europe, sauf en Suisse : dans cet état, la valorisation est possible sous réserve de teneurs limites en zinc et en cadmium notamment<sup>6</sup>.

La norme EN-450 de 2012 pour l'utilisation de cendres volantes dans les bétons autorise cependant des cendres issues de co-combustion de combustibles comprenant jusqu'à 50% de biomasse.

---

<sup>6</sup> Communication personnelle Peter Kruspan (HOLCIM) 2015.

# Volet 2 : Caractéristiques des cendres

## 1 Caractéristiques

### 1.1 Données générales

Globalement, les cendres de biomasse sont principalement composées de chaux (10 à 30 %) et de silice (5 à 60 %).

De manière indicative, on peut donner des caractéristiques communes à toutes les cendres de bois. Elles ont un pH toujours nettement basique (autour de 12) et ont une valeur neutralisante d'environ 50 %, c'est-à-dire qu'une tonne de cendre à la même pouvoir neutralisant qu'une tonne de carbonates chaux (CaCO<sub>3</sub>) ou 500 kg de Chaux (CaO).

Par ailleurs, les cendres ont des teneurs en azote quasi nulles (l'azote est volatilisé durant la combustion), des teneurs de l'ordre de 10 à 35 % de calcium, quelques % de potassium et magnésium, et de l'ordre de 1 % de phosphore.

La combustion n'étant pas complète, en particulier sur les petites installations, il reste des « imbrûlés » correspondant au carbone organique total (COT), en général dans des proportions inférieures à 5-10 % de la MS, mais avec une grande variabilité (entre 0 et 30 %).

Les cendres contiennent également des éléments traces métalliques ou "métaux lourds" potentiellement polluants : arsenic, bore, cadmium, cuivre, chrome, argent, molybdène, mercure, nickel, et zinc; certains devant être considérés comme des oligo-éléments d'intérêts tels que le bore, le cuivre, le zinc. Ces ETM sont présents à l'état naturel dans la biomasse des végétaux. La combustion de la biomasse tend à concentrer certains ETM dans les cendres, plus ou moins selon qu'il s'agit de cendres sous foyer ou des cendres volantes.

Il est important de souligner l'existence d'une forte variabilité entre les cendres. En effet, selon principalement l'origine et la nature de la biomasse et les caractéristiques de l'installation de combustion, la composition des cendres varie sensiblement. Cela constitue un frein important à l'autorisation de mise sur le marché des cendres en tant que matière fertilisante.

Enfin, la composition varie fortement en fonction du type de cendres considérées : cendres sous foyer, cendres de dépoussiéreur/multi-cyclone, et cendres volantes des filtres à manche ou des électro-filtres.

### 1.2 Taux de cendres

Le taux de cendre varie selon les biomasses et selon les équipements : il se situe entre 0,5 (plaquette forestière sans écorce) et 15 % (déchets de bois, écorces, combustibles agricoles) de la matière brute, avec un taux d'environ 1,5-2,5 % pour ces cendres de chaufferies bois alimentées majoritairement par de la plaquette forestière.

Globalement pour les fours à grille, la répartition des différents types de cendres est la suivante :

- cendres sous foyer : 70-95 %
- cendres de multi-cyclone : 10-25 %
- cendres volantes : 1-8 %

Très généralement, les cendres sous foyer et les cendres de multi-cyclone sont récupérées sous la grille : elles représentent donc entre 90 et 99 % du flux total de cendres de l'installation.

L'INERIS<sup>7</sup> fournit des indications sur la répartition massique des cendres de biomasse sur la base d'une approche bibliographique.

---

<sup>7</sup> INERIS. Note sur l'assimilation d'un produit (bois faiblement adjuvanté) à un combustible de référence et sur la surveillance des installations classées dans la rubrique 2910B. Ref. DRC-12-126318-06147Av2. 2014.

**Tableau 12 : Répartition massique des différents types de cendres en fonction des combustibles**

<b>Fraction cendres \ Type biomasse</b>	<b>Ecorce</b>	<b>Bois</b>	<b>Paille</b>
Cendres sous foyer	75,0 - 85,0	70,0 - 90,0	80,0 - 90,0
Cendres cyclone	15,0 - 25,0	10,0 - 30,0	3,0 - 6,0
Cendres filtre	2,0 - 5,0	4,0 - 8,0	5,0 - 10,0
Poussières émises	0,1 - 2,0	0,2 - 3,0	0,2 - 1,0

De plus, le rapport massique entre les différentes fractions de cendres dépend de la technologie de combustion :

- Dans les fours à lit fixe/grille, les cendres sous foyers représentent habituellement 60 à plus de 95% du total des cendres générées, les cendres volantes grossières (multi-cyclone) de 5 à 30%, alors que la fraction fine des cendres volantes ne représente que 2 à 15 %.
- Dans les fours à lit fluidisé, les cendres volantes fines représentent la plus grande fraction du total et le rapport est inversé.
- Dans les spreader stoker (système de combustion équipé d'un système de projection mécanique ou pneumatique des combustibles), les données sont beaucoup plus variables : les cendres sous foyer peuvent représenter entre 30 et 80 % des cendres produites<sup>89</sup>.

### 1.3 Caractéristiques des cendres

Les sources des données sont issues :

- de la littérature :
  - IRDA
  - CIBE
  - ADEME (étude 2014)
  - Biocombustibles SAS
  - Nombreuses autres références.
- issues d'analyses fournies par les exploitants.

#### 1.3.1 CENDRES ISSUES DE CHAUFFERIES COLLECTIVES AU BOIS

##### 1.3.1.1 Cendres sous foyer avec ou sans cendres issues du dépoussiérage (multi cyclone)

###### • Teneurs en alcalins et oxydes

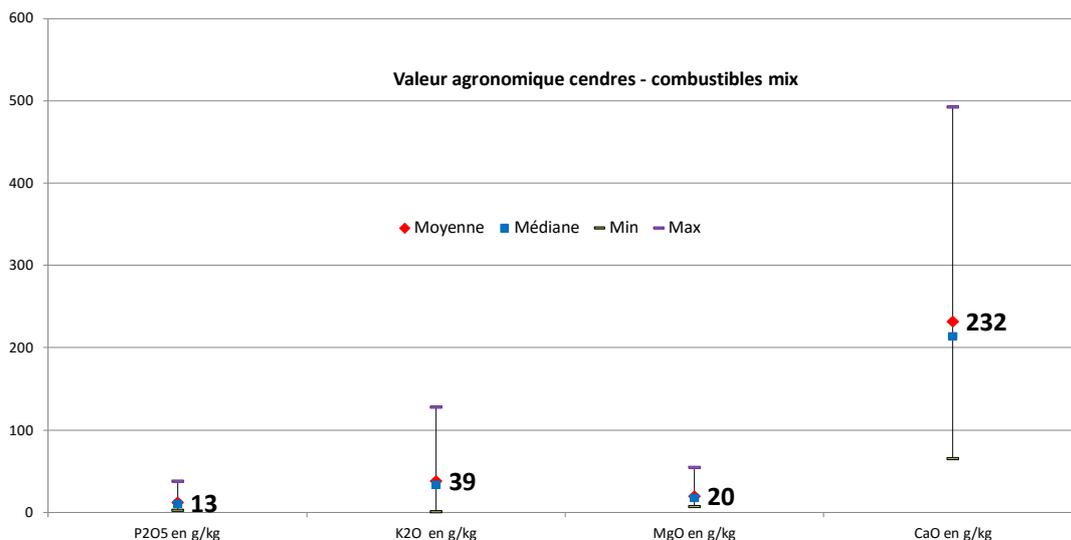
Les données portent sur 150 analyses réalisées entre 2013 et 2015, sur une trentaine de chaufferies collectives au bois (source BIOCOMBUSTIBLES SAS (146 analyses), IDEX (4 analyses) et étude ADEME 2014<sup>10</sup> (10 analyses). Ces chaufferies consomment principalement des plaquettes forestières mais également des connexes de scieries, des bois en fin de vie propres (palettes), des broyats d'élagages...

<sup>8</sup> Kenneth W. Ragland, Kenneth M. Bryden. Combustion Engineering, Second Edition.

<sup>9</sup> Source CEDEN

<sup>10</sup> ADEME. Etude sur la valorisation des cendres de biomasse en forêt 2011-2013. Mars 2014.

**Figure 1 : Paramètres portant les principaux alcalins et oxydes en g/kg de MS**



Il en ressort :

- une forte teneur en chaux (CaO, (CaOH)<sub>2</sub>...) : 23 % sur MS
- une teneur conséquente en potasse : près de 4 %
- des teneurs plus faibles en magnésie (2 %) et en phosphore (1,2 %).

Les anions sont principalement :

- des phosphates, (1 à 15% P-P2O5 selon les intrants)
- oxydes, hydroxydes, carbonates, silicates (équivalent de 20 à 70 % en CaO)
- sulfates (moins de 1% à 10%)
- peu de chlorures (moins de 1%)

Les cations sont principalement calcium, potassium sodium, magnésium.

La valeur neutralisante des cendres, très recherchée en agriculture ou en forêt, est mesurée par dosage acido-basique (norme NF EN 12945) ou simplement calculée suivant la formule (CaO + 1.4 MgO). Les deux résultats sont en général très proches (source Laboratoire Franck Duncombe à Caen).

La plupart de ces éléments sont constitutifs des plantes et sont des éléments nutritifs ou des éléments neutres vis-à-vis de la plante.

Le **chlore** est largement diffusé par les engrais car c'est l'anion souvent lié au potassium. Dans les engrais (environ 50% d'un engrais de référence comme le chlorure de potassium d'un intrant de suspensions fertilisante telle de chlorure de potassium). L'épandage de 500 000 tonnes de cendres sous foyer en France apporterait au plus 5 000 tonnes de chlore, contre environ 100 000 tonnes de chlore issus des épandages de 300 000 tonnes de chlorure de potassium. Le chlore des cendres de biomasse ne constitue donc pas un risque pour les nappes.

#### • **Eléments-traces**

Le tableau suivant indique la moyenne des 150 analyses pour les éléments-traces métalliques sur 3 périodes pour montrer l'évolution positive de la qualité des cendres (moins de déchets bois suspects). Ainsi que la moyenne des 10 installations auditées par l'ADEME en 2013-2014. Pour information, figurent les valeurs limites de la réglementation française pour l'épandage et de la norme NF U 44 051 (qui exclut les cendres en raison de leur caractère inorganique).

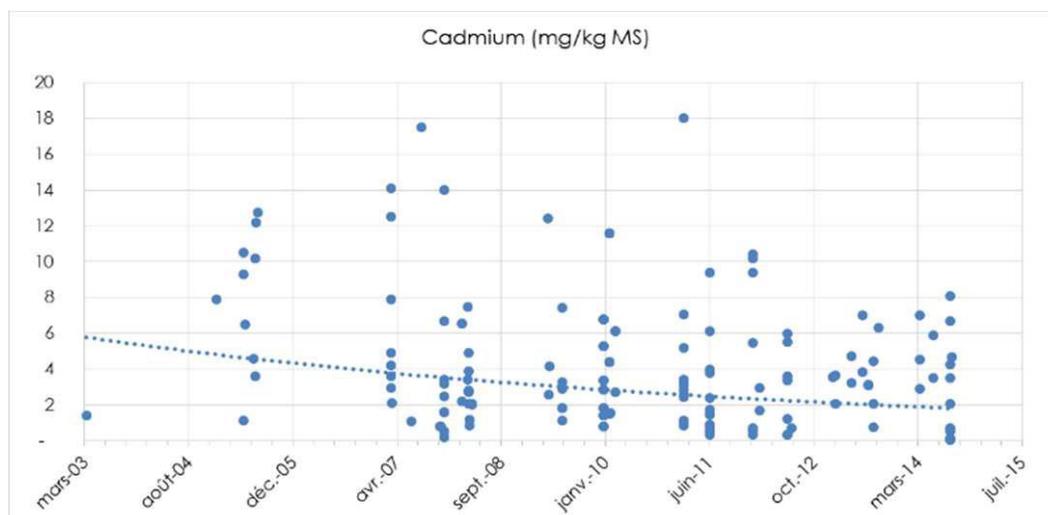
**Tableau 13 : Eléments-traces métalliques dans les cendres sous foyer de chaufferies collectives au bois (données France)**

Paramètres	Moyennes des analyses CEDEN			Moyenne analyses ADEME (2014)	Réglementation épandage (logique déchet) France	Norme compost NF U 44 051 France	Projet commission européenne 2017 Engrais	Réglementations européennes (Allemagne, Autriche, Suède, Danemark, Finlande)
	Période 2003-2014	Période 2003-2010	Période 2010-2014					
	Combustibles mix dont bois en fin de vie propres			Plaquettes forestières majoritaires				
	150 analyses			10 analyses				
	mg/kgMS							
Cr	136	154	134	176	1 000	120		100-300
Ni	42	49	37	26	200	60	120	60-200
Cu	395	368	438	284	1 000	300		200-700
Zn	836	1 151	666	343	3 000	600		1 200-7 000
Cd	3	6	4	3	10	3	3	1,5-30
Pb	282	457	178	83	800	180	150	100-300
Hg	-	-	-	-	10	2	2	0,8-3
As	14	17	12			18	60	20-45
Se	2	2	2			12		

On peut raisonnablement retenir les fourchettes de valeur fournies par les colonnes en grisé et dont les chiffres sont indiqués en gras.

Le renforcement des contraintes en France sur l'utilisation des bois en fin de vie (réglementation ICPE et démarche de sortie de statut de déchets des bois palettes) devrait aboutir à des cendres dont les teneurs en éléments-traces métalliques se situent plutôt dans la fourchette basse.

**Figure 2 : Evolution de la teneur en Cd depuis 2003 dans les cendres de biomasse (CEDEN)**



• **Composés traces organiques**

Compte tenu du mode d'obtention par combustion, les teneurs en composés traces organiques sont en général faibles dans les cendres. Les résultats suivants indiquent des teneurs très en dessous des seuils maximaux fixés pour l'épandage en France.

**Tableau 14 : Teneurs en CTO de cendres sous foyer de chaufferies collectives au bois (en mg/kg MS)**

	Benzo(a)pyrene	Benzo(b)fluoranthène	Fluoranthène	Somme 7 PCB
Nombre d'analyses	5	5	8	5
Moyenne	0,12	0,09	0,05	0,08
Rappel seuils épandage	2	2,5	5	0,8

- **Dioxines et furanes**

L'OFEFP<sup>11</sup> indique les teneurs en dioxines dans les cendres suivantes :

- cendres sous foyer (combustion de bois naturel) : environ 4 ng I.TEQ/kg,
- cendres sous foyer (combustion de bois usagés) : environ 10 ng I.TEQ/kg, – cendres
- volantes sous cyclone (combustion de bois usagés) : 800 ng I.TEQ/kg

- **Silice (SiO<sub>2</sub>)**

La silice est l'élément le plus important dans les cendres après le calcium, entre 5 et 55 % sur MS dans les cendres sous foyer (entre 11 et 42 % sur MS dans les cendres volantes) selon des analyses réalisées par l'IRDA. Les biomasses herbacées comme le panic, sont beaucoup plus riches en silice que les biomasses ligneuses. Cette forte teneur en silice les rapproche des cendres siliceuses de charbon et les rend donc plus adaptée à une valorisation matériau, notamment comme constituant des ciments et des bétons.

- **Matière organique et carbone organique total : les « imbrûlés ».**

Les cendres de biomasse contiennent une part de matière organique, en général faible (autour de 5 % sur MS), traduisant une combustion incomplète.

L'estimation de la matière organique est réalisée par la mesure de la matière volatile par calcination. Cette matière volatile, ou « perte au feu » ou « imbrûlés » est indésirable pour certaines voies de valorisation (céramique, cimenterie...) en raison de son caractère dégradable. Pour les cendres, la matière volatile est en général obtenue par calcination à 550 °C pendant 5 h (NF EN 12879 : perte au feu) sur le modèle des boues d'épuration. Parfois, c'est le protocole SVDU<sup>12</sup> qui est mis en œuvre sur le modèle des mâchefers : calcination à 500 °C pendant 4 h pour obtenir les « imbrûlés ». Compte tenu de la température et de la durée mises en jeu, la valeur « imbrûlés » est donc toujours inférieure à la valeur « perte au feu ». La matière volatile peut aussi être obtenue par calcination à 850 °C, la valeur étant supérieure à celle obtenue à 550 °C, notamment en raison de la volatilisation de certains carbonates au dessus de cette température.

Le carbone organique total est obtenu par simple calcul : COT = environ ½ MV ou par dosage (oxydation sulfochromique ou par combustion à la bombe).

### 1.3.1.2 Cendres volantes

Les cendres volantes issues des installations équipées d'une grille (cas très majoritaire) sont plus concentrées en métaux lourds et en chlorures. Ce constat est massivement admis par l'ensemble des acteurs de la filière. Pour cette raison, les cendres volantes sont plus difficilement valorisables que les cendres sous foyer. De manière générale, le retour au sol des cendres volantes est interdit en Europe. Toutefois, une nuance importante doit être apportée à ce constat : les cendres volantes issues de lit fluidisé, majoritaires dans ces équipements, sont en général beaucoup moins concentrées en éléments polluants, ces derniers étant plus répartis entre les cendres sous foyer et les cendres volantes.

- **Eléments fertilisants**

La composition des cendres volantes est globalement assez proche de celle des cendres sous foyer sur le plan des éléments fertilisants ou neutralisants : phosphore, magnésie, potasse, chaux.

- **Eléments traces métalliques**

Le tableau ci-après confirme que les cendres volantes de chaufferies équipées d'un four à grille sont beaucoup plus concentrées en éléments traces que les cendres sous foyer. Ce constat explique que dans la plupart des pays européens, les cendres volantes issues de ces installations sont exclues du retour au sol.

---

<sup>11</sup> Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage (Suisse)

<sup>12</sup> Protocole SVDU de décembre 2000 (Syndicat national du traitement et de la valorisation des déchets urbains et assimilés) : « Protocole technique pour la détermination du potentiel polluant des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères ».

**Tableau 15 : Comparaisons des teneurs en éléments traces métalliques de cendres volantes (CV) et de cendres sous foyer (CSF)**

Eléments traces	Cendres de chaufferies biomasse collectives au bois		
	Cendres volantes		Cendres sous foyer (très majoritairement en mélange avec les cendres de multicyclone)
	10 échantillons période 2014 (INERIS)	3 échantillons (exploitants)	150 échantillons période 2003-2014 (CEDEN)
	Mg/kg MS		
Cr	299,0	135	135,9
Ni	26,6	22	42,3
Cu	547,0	245	394,7
Zn	12 640,0	5 435	836,1
As	250,0	89	13,8
Se	8,7		2,0
Mo	126,4		16,4
Cd	61,3	28	3,3
Pb	2 983,0	1 426	282,0
Hg	1,6	1	0,2

**Tableau 16 : Composition de cendres volantes et sous foyer (fours à grille) issues de diverses biomasses (hors FSLP) <sup>13</sup>**

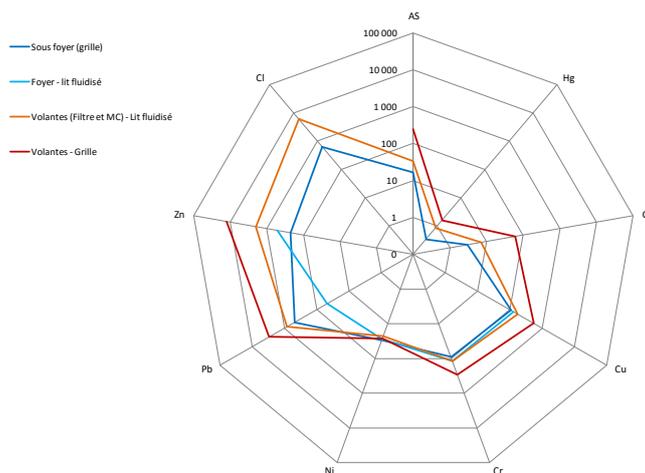
Paramètres	Bois		Panis		Saule	
	Vol.	Grille	Vol.	Grille	Vol.	Grille
<b>Cendres récupérées</b>	0,9 %		4,1 %		4,1 %	
<b>Types de cendres</b>	Vol.	Grille	Vol.	Grille	Vol.	Grille
<b>Cendres / Cendres totales</b>	2,8	97,2	2,5	97,5	2,0	98,0
<b>Densité apparente (g/ml)</b>	-	0,26	-	0,24	-	0,38
<b>Densité réelle (g/ml)</b>	-	0,71	-	0,74	-	0,92
<b>Volatiles (%)</b>	30,6	51,7	18,7	3,7	25,3	23,9
<b>Fertilisants (% b.s.)</b>						
<b>N</b>	0,6	0,3	0,4	0,1	0,5	0,3
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	1,9	1,1	1,4	1,0	1,5	1,0
<b>MgO</b>	5,8	3,7	3,8	3,7	5,1	3,6
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	9,5	1,8	4,6	3,8	7,7	5,1
<b>K<sub>2</sub>O</b>	2,6	5,0	4,1	5,2	4,1	11,0
<b>CaO</b>	24,8	19,7	16,5	16,2	29,3	30,2
<b>Métaux lourds (% b.s.)</b>						
<b>Ti</b>	0,078	0,042	0,138	0,156	0,084	0,078
<b>V</b>	0,003	0,000	0,000	0,003	0,003	0,000
<b>Cr</b>	0,047	0,172	0,026	0,156	0,031	0,036
<b>Co</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Ni</b>	0,024	0,079	0,008	0,385	0,016	0,016
<b>Cu</b>	0,048	0,032	0,024	0,016	0,048	0,016
<b>Zn</b>	1,004	0,137	0,361	0,056	0,627	0,193
<b>Sr</b>	0,059	0,051	0,042	0,034	0,076	0,076
<b>Zr</b>	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,015
<b>Nb</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Ba</b>	0,09	0,134	0,063	0,045	0,09	0,09
<b>Pb</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Autres (% b.s.)</b>						
<b>C</b>	14	41,7	9,6	2,6	10,7	13,1
<b>Cl</b>	3,4	0,1	1,3	0,1	1,4	0,1
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2,3	1,5	3,8	4,5	2,6	3,1
<b>SiO<sub>2</sub></b>	11,4	6,7	41,9	55,2	16,4	17,2
<b>SO<sub>3</sub></b>	4,4	1,4	1,5	0,3	3,2	1,7
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3,7	4,2	2,0	4,2	2,4	1,7
<b>MnO</b>	0,65	1,79	0,40	0,25	0,46	0,30

Vol. : Cendres volantes

Le graphique suivant illustre la différence de concentration en éléments-traces dans les cendres sous foyer et dans les cendres volantes. On constate que les cendres volantes de lits fluidisés sont de meilleure qualité que celles provenant de four à grille.

<sup>13</sup> IRDA. Bilan énergétique, émissions gazeuses et particulaires de la combustion de la biomasse agricole à la ferme. Mars 2012.

**Figure 3 : Comparaison de cendres sous foyer et volantes au regard des éléments-traces métalliques et du chlore (CEDEN)**



Le zinc, élément hautement volatil, est toujours présent en plus grande quantité dans les cendres volantes (source IRDA) : il se transforme en phase gazeuse lors de la combustion et s'accumule dans les cendres volantes.

Le chlore et les sulfates se concentrent dans les cendres volantes.

Par ailleurs, la silice du sable des lits fluidisés peut se retrouver dans les cendres et en dilue les concentrations en éléments-traces notamment. On constate parfois dans les lits fluidisés la formation de molécules combinant CaO et silice (notamment wollastonite) qui se retrouvent dans les cendres.

Les cendres sous foyer de chaudière à lit fluidisé concentrant trop de silice ne doivent pas être épandues sur les sols forestiers. La contamination des cendres volantes avec la matière du lit fluidisé (sable) diminue la teneur en éléments nutritifs, augmente les coûts de manipulation et d'épandage, et comporte un risque de lésion mécanique du tronc des arbres lors de l'épandage<sup>14</sup>.

Au regard de la réglementation française, les cendres volantes (filtres à manches, électrofiltres) présentent des concentrations en métaux souvent élevées et parfois en éléments organiques (PCDD/F), souvent au dessus des seuils définis pour le régime enregistrement, imposant une information des services des installations classées et une périodicité plus forte pour l'analyse des combustibles et des cendres pour les installations concernées<sup>15</sup>.

#### • Dioxines et furanes

Les teneurs en dioxines et furanes dans les cendres volantes sont comprises entre 0 et 400 ng I.TEQ/kg pour le bois naturel et supérieure à 700 ng I.TEQ/kg lors de la combustion de déchets de bois contenant des composés chlorés. L'OFEFP indique les teneurs en dioxines dans les cendres volantes sous filtre (combustion de bois usagés) d'environ 4 000 ng I.TEQ/kg.

Les dioxines et furanes semblent se concentrer plus particulièrement dans les cendres volantes des installations ce qui confirme l'intérêt de disposer de systèmes de traitement des fumées efficaces. Les cendres sous foyer semblent nettement moins chargées que les cendres volantes à l'exception des études menées par Bröker et al et Dyke et al.

Le groupe de travail cendre du CIBE préconise dans son rapport de la commission de 2015 l'élaboration d'un seuil permettant de distinguer le bois naturel des bois contaminés avec des composés chlorés : ce seuil pourrait être compris entre 400 et 700 ng I.TEQ/kg.

### 1.3.2 CONTRIBUTION EN ELEMENTS TRACES METALLIQUES DE CHAQUE FRACTION DE CENDRES D'UNE CHAUFFERIE

Les qualités des différents types de cendres produites par un équipement de combustion à grille sont différentes. Les études mettent en évidence deux types de comportement des métaux lourds :

- ceux qui sont retenus en majorité dans les cendres sous foyer : c'est le cas par exemple de l'As, du Cr et du Cu,
- ceux qui se retrouvent dans les cendres volantes : c'est le cas du Cd, du Pb et du Zn. Plus de 70% de ces métaux sont présents dans les cendres volantes.

<sup>14</sup> ADEME. Etude sur la valorisation des cendres de biomasse en forêt 2011-2013. Mars 2014.

<sup>15</sup> ADEME. Expertise énergétique et environnementale de chaufferies biomasse. 2014

Les cendres volantes, alors qu'elles ne représentent que moins de 1 % du flux total de cendres, concentrent notamment près de 70 % du mercure, 40 % du cadmium, 40 % du plomb et 25 % du zinc.

Les cendres grossières issues du multicyclone concentrent aussi certains éléments, par rapport aux cendres sous foyer, comme le cadmium (près de 50 %) et le chlore (plus de 60 %).

Globalement, les cendres de multi cyclone ont tendance à dégrader légèrement la qualité des cendres sous foyer (dans le cas d'un mélange) pour ce qui concerne les éléments-traces mais contribuent fortement en termes de CaO et d'éléments fertilisants. Par ailleurs, il est démontré que 95 % des cendres en mélange respectent les seuils d'épandage français.

### 1.3.3 CENDRES ISSUES D'INSTALLATIONS EQUIPEES D'UN FOUR A LIT FLUIDISE

La température de combustion dans des fours à lit fluidisé est généralement plus faible (entre 800 et 900 ° C) que dans les fours à lit fixe (900 à 1050 ° C) : l'enrichissement des éléments volatils dans les fractions de cendres volantes de fours à lit fluidisé est moins prononcé par rapport à cendres volantes provenant des fours à lit fixe. Ainsi, les cendres volantes de fours à lits fluidisés ont des teneurs en métaux plus faibles que les cendres volantes issues de fours à grille.

### 1.4 Cendres des boues d'épuration

L'incinération des boues d'épuration urbaines génère souvent deux types de résidus : les cendres retenues par le cyclone (dites « cendres minérales ») et les résidus d'épuration des fumées d'incinération de boues (REFIOB). Ces dernières sont composées des cendres non captées par le cyclone et captées par filtres à manche, après traitement au bicarbonate de sodium et au charbon actif.

Les cendres minérales représentent de l'ordre de 10 % de la matière sèche incinérée et les REFIB 4 %.

De par leur mode de production, les cendres d'incinération ont une teneur en matière organique et une humidité très faibles, voire nulle. Elles sont principalement composées de silice, de fer, de calcium, d'alumine, d'oxyde de magnésium, et de pentoxyde de phosphore [Lin et al, 2005; Merino et al, 2005 ; Corella et Toledo, 2000 ; Monzó et al, 2003]. Compte-tenu de la variété des eaux usées traitées et donc de la variété des boues incinérées, la composition de la cendre peut varier significativement. Elle dépend, notamment, en grande partie des additifs introduits lors du conditionnement des boues (opération qui précède la déshydratation et qui consiste à déstabiliser la suspension colloïdale afin d'en augmenter le rendement). Les concentrations en éléments traces métalliques sont élevées en raison des teneurs déjà élevées dans les boues brutes.

Les cendres issues de l'incinération des boues en lit fluidisé ont des propriétés pouzzolaniques (dus à la présence de silice réactive) qui les rendent potentiellement utiles dans les produits de béton manufacturés.

## 2 Facteurs influant sur la qualité des cendres de biomasse

Les cendres sont issues de la combustion de biomasse végétale (paille, bois...), de biomasse animale (carcasses), de déjections (fientes) et boues d'épuration, et de déchets (bois en fin de vie, liqueurs noires, déchets plastiques). Ainsi, le **facteur principal** influençant la qualité des cendres est **le type de biomasse** dont elles sont issues.

Toutefois, on dénombre au moins **9 facteurs** qui influent sur la qualité des cendres :

- 1 Le type d'intrants ou de mélange d'intrants (pour le bois : essence, part d'écorce, le type de biomasse, de déchets...)
- 2 Le type de conditionnement appliqué à ces intrants : broyage, criblage, déferrailage, ajout d'adjuvants dans le cas des biomasses agricoles (CaO pour limiter la production de mâchefers, carbonate de soude pour éviter la production d'acide chlorhydrique ou d'acide sulfurique...).
- 3 Le type de traitement thermique (combustion, pyrolyse...)
- 4 Le type d'équipement de combustion : lit fluidisé, four à grille...
- 5 La taille de l'installation, la température de combustion
- 6 Le mode de traitement des fumées : cyclone, électro-filtre...
- 7 Les modalités de récupération des cendres : mélange ou non des cendres sous foyer et cendres cycloniques ou multi-cyclonique/cendres humides/sèches
- 8 La conduite de l'installation
- 9 Les techniques de post-traitement (mélanges, broyage, extraction chimique...)

Ceci explique les difficultés récurrentes à qualifier précisément les cendres de biomasse : il est **impératif**, pour pouvoir exploiter des informations relatives à la composition des cendres, de disposer d'un minimum d'informations sur les conditions de leur production. Ainsi, une cendre volante d'une installation équipée d'un lit fixe aura une composition différente d'une cendre volante issue d'un équipement de combustion de type lit fluidisé.

## 2.1 Incidence du type d'intrants ou de mélange d'intrants

### 2.1.1 TENEUR EN CENDRES

Les matériaux ligneux comme le bois et ses sous-produits ont une teneur relativement faible en cendres : autour de 0,5 à 1,5 % ou jusqu'à 2,5 % sur MS voire plus pour de l'écorce. Les biomasses agricoles ont des teneurs en cendres beaucoup plus importantes : entre 2 et 12 % sur MS. Ce constat s'explique par la forte teneur en matière volatile du bois (plus de 99 % sur MS) contre 90 à 95 % pour les biomasses agricoles.

- **Exemples d'analyses**

**Tableau 17 : % de cendres de différentes biomasses<sup>16</sup>**

	Bois	Panic	Saule
% cendres sur MS à 750°C	0,54	3,65	2,76
% cendres sur MS à 1 100°C	0,38	4,3	4

**Tableau 18 : Part des catégories de cendres de différentes biomasses<sup>17</sup>**

	Bois	Panic	Saule
Cendres récupérées	0,9%	4,1%	4,1%
Cendres sous grilles	2,8 %	1,0%	2,0
Cendres volantes	97,2%	99,0%	98,0

### 2.1.2 COMPOSITION PHYSICO-CHEMIE

#### 2.1.2.1 Selon le type de biomasse

**Tableau 19 : Composition de cendres de diverses biomasses<sup>18</sup>**

Composition chimique des cendres (%)	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Toumesol	17,8	6,4	0,2	9,4	14,5	14,6	8,5	6,8	0,1	21,2
Coton	10,8	1,9	0	4	1,3	20,7	7,5	1,7	1,3	49,6
Café	3,8	0,2	0,2	4,1	7,5	9,2	2,2	0,4	0,6	43,8
Moutarde	16,9	0,8	0,1	2	1,5	42,8	9,2	14,3	2	7,4
Noix palmier	63,2	3,9	0,2	2,8	4,5	n.m*	3,8	2,8	0,8	9
Poivre	13,2	2,9	0,1	9,6	7,2	8,6	3,9	9,1	0,9	30,3
Soja	1,7	2,5	0,2	4,9	7,4	21,4	7,1	3,7	5,3	30,5
Arachide	27,7	10,3	0,1	3,7	8,3	24,8	5,4	10,4	0,8	8,5
Noix coco	69,3	6,4	0,01	1,6	8,8	2,5	1,6	0,01	4,8	8,8
Rafle de maïs	32,74	0,70	0,02	4,68	5,05	2,63	6,83	0,12	1,38	29,24
Paille	59,52	8,76	0,02	5,07	2,18	6,52	2,26	0,36	1,60	13,16

<sup>16</sup> IRDA. Bilan énergétique, émissions gazeuses et particulaires de la combustion de la biomasse agricole à la ferme. Mars 2012.

<sup>17</sup> Id.

<sup>18</sup> RECORD. Combustion de mélanges, combustibles classiques/biomasse. 2001

**Tableau 20 : Composition de cendres volantes et sous foyer (fours à grille) issues de diverses biomasses (hors FSLP) <sup>19</sup>**

Paramètres	Bois		FSLP		Panic		Sauge	
<b>Cendres récupérées</b>	0,9 %		10,2 %		4,1 %		4,1 %	
<b>Types de cendres</b>	Vol.	Grille	Vol.	Grille	Vol.	Grille	Vol.	Grille
<b>Cendres / Cendres totales</b>	2,8	97,2	1,0	99,0	2,5	97,5	2,0	98,0
<b>Densité apparente (g/ml)</b>	-	0,26	-	0,52	-	0,24	-	0,38
<b>Densité réelle (g/ml)</b>	-	0,71	-	0,95	-	0,74	-	0,92
<b>Volatiles (%)</b>	30,6	51,7	26,3	12,4	18,7	3,7	25,3	23,9
<b>Fertilisants (% b.s.)</b>								
<b>N</b>	0,6	0,3	0,9	0,3	0,4	0,1	0,5	0,3
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	1,9	1,1	2,9	3,8	1,4	1,0	1,5	1,0
<b>MgO</b>	5,8	3,7	6,9	8,0	3,8	3,7	5,1	3,6
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	9,5	1,8	12,8	16,4	4,6	3,8	7,7	5,1
<b>K<sub>2</sub>O</b>	2,6	5,0	5,1	11,0	4,1	5,2	4,1	11,0
<b>CaO</b>	24,8	19,7	20,4	22,0	16,5	16,2	29,3	30,2
<b>Métaux lourds (% b.s.)</b>								
<b>Ti</b>	0,078	0,042	0,072	0,066	0,138	0,156	0,084	0,078
<b>V</b>	0,003	0,000	0,003	0,003	0,000	0,003	0,003	0,000
<b>Cr</b>	0,047	0,172	0,031	0,031	0,026	0,156	0,031	0,036
<b>Co</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Ni</b>	0,024	0,079	0,016	0,024	0,008	0,385	0,016	0,016
<b>Cu</b>	0,048	0,032	0,064	0,168	0,024	0,016	0,048	0,016
<b>Zn</b>	1,004	0,137	0,779	0,217	0,361	0,056	0,627	0,193
<b>Sr</b>	0,059	0,051	0,051	0,042	0,042	0,034	0,076	0,076
<b>Zr</b>	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,015
<b>Nb</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Ba</b>	0,09	0,134	0,054	0,018	0,063	0,045	0,09	0,09
<b>Pb</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Autres (% b.s.)</b>								
<b>C</b>	14	41,7	11,5	8,2	9,6	2,6	10,7	13,1
<b>Cl</b>	3,4	0,1	3,5	1,2	1,3	0,1	1,4	0,1
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2,3	1,5	2,0	2,0	3,8	4,5	2,6	3,1
<b>SiO<sub>2</sub></b>	11,4	6,7	13,0	10,8	41,9	55,2	16,4	17,2
<b>SO<sub>2</sub></b>	4,4	1,4	3,9	6,1	1,5	0,3	3,2	1,7
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3,7	4,2	4,3	5,7	2,0	4,2	2,4	1,7
<b>MnO</b>	0,65	1,79	0,46	0,29	0,40	0,25	0,46	0,30

Vol. : Cendres volantes

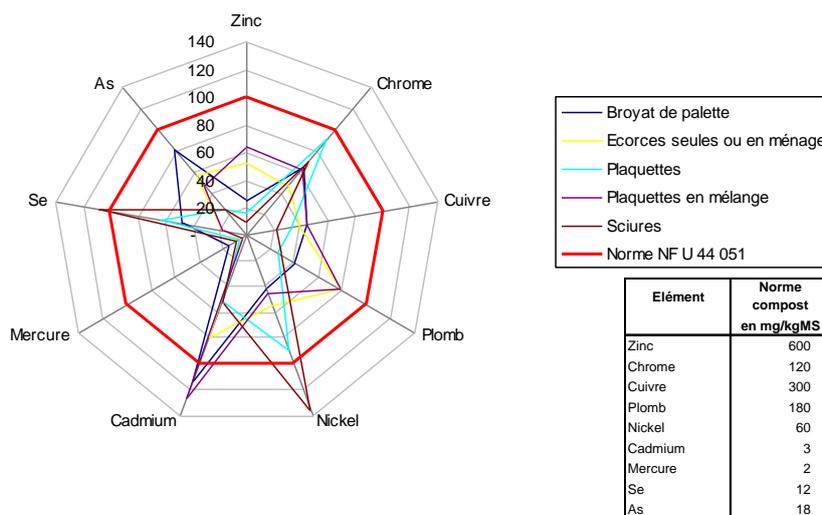
Les cendres de paille notamment sont très riches en silice contrairement aux cendres de bois, riches en CaO et pauvres en silice.

Les cendres sont riches en sels alcalins (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O). Les cendres de biomasse agricole sont plus riches en chlore et en soufre. Ces éléments sont un véritable handicap à la combustion de la biomasse en lit fluidisé<sup>20</sup> et sont à l'origine de la production d'acide chlorhydrique et d'acide sulfurique, très corrosifs pour les équipements de combustion, les échangeurs, les tubes de fumées...

#### 2.1.2.2 Incidence des traitements du bois

Le graphique suivant, issu de travaux réalisés par CEDEN en partenariat avec BIOCMBUSTIBLES SAS, montre l'incidence de l'origine du combustible sur la qualité des cendres. Des teneurs élevées en zinc ou en plomb (ex : > 1 000 mg/kg MS) dans les cendres sont un bon indicateur d'une mauvaise qualité de combustible et de la présence de déchets de bois adjuvantés.

**Figure 4 : Relation entre la qualité des cendres et nature des combustibles (CEDEN)**



<sup>19</sup> IRDA. Bilan énergétique, émissions gazeuses et particulaires de la combustion de la biomasse agricole à la ferme. Mars 2012.

<sup>20</sup> RECORD. Combustion de mélanges, combustibles classiques/biomasse. 2001

Le cadmium, le plomb, le zinc et le cuivre, témoignent de la présence de traitements du bois. Les trois premiers se concentrent préférentiellement dans les cendres volantes.

Les traitements du bois, le collage, les finitions de revêtement apportent certains éléments qui vont se concentrer dans les cendres :

- Adjuvants provenant du traitement de préservation du bois (traitements anti bleu...) : Cu, Cr, HAP, CTO
- Adjuvants provenant du collage du bois (panneaux de bois reconstitués et panneaux de type lamellé collé) : Cl (déchets de démolition). Le chlore est désormais remplacé par des sulfates.
- Adjuvants provenant des finitions de revêtement du bois (lasures, vernis, peintures) : Zn, Cd, Cr, Cu.

## 2.2 Incidence du type de conditionnement appliqué aux intrants

### 2.2.1 BIOMASSES HERBACEES (PAILLE, MYSCANTHUS...)

Les combustibles issus de plantes herbacées ou ligno-cellulosiques comme la paille et le miscanthus présentent des teneurs en silice, chlore et en potasse importantes. Ces combustibles ont une température de fusibilité des cendres basse et leur combustion peut entraîner des risques de vitrification.

La technologie doit être adaptée pour éviter l'usure prématurée des équipements, limiter le traitement de l'air et réduire les risques de mâchefers :

- grilles refroidies à l'air ou à l'eau pour éviter la production de mâchefers
- injection de CaO si nécessaire (2 % de CaO)
- Injection de carbonate de Sodium si nécessaire pour piéger le chlore et le soufre et réduire ainsi la production d'acide chlorhydrique et d'acide sulfurique.

L'ajout de ces matières a une incidence sur la composition des cendres.

### 2.2.2 GRANULES

Certains liants, comme l'amidon ou la mélasse par exemple, sont nécessaires pour la constitution des granulés (granulés de bois ou de biomasse agricole). Ces produits naturels ont une incidence sur la composition des cendres.

## 2.3 Incidence du type de traitement thermique

Les différents types de traitement thermique ont également une influence sur la production de résidus. La pyrolyse donne naissance à un résidu charbonneux (10 à 30 % de la masse de matière sèche du départ).

## 2.4 Incidence de l'équipement de combustion

- Type d'équipements de combustion

Les équipements de combustion (grilles, lits fluidisés, spreader stoker) ont également une incidence non seulement sur la répartition massique des cendres mais également sur leur qualité. On constate que les cendres volantes issues de lit fluidisés, sont moins concentrées en éléments-traces que celles issues de four à grilles.

**Tableau 21 : Teneurs en éléments-traces de cendres volantes (en mg/kgMS)**

	Nbre d'analyses	AS	Hg	Cd	Cu	Cr	Ni	Pb	Zn
Cendres volantes grilles	3	89	1	28	245	135	22	1 426	5 435
Cendres volantes lit fluidisé	3	12	0	2	61	44	9	278	698

De même, les analyses de comportement à la lixiviation sont plus favorables pour les cendres volantes issues de lits fluidisés.

**Tableau 22 : Comportement à la lixiviation de cendres volantes de différents types d'installations**

Paramètres	Moyenne cendres volantes chaufferies biomasse grille	Cendre volante lit fluidisé réf. 1	Cendres volantes lit fluidisé réf. 2
Chlorures	22 332	1 100,0	6 100
Fluorures	24	7,8	
Sulfates	66 867	37,0	
Fraction soluble	173 304	29 170	26 900

- Matériau de la grille de combustion

Il est admis que les grilles chromées des équipements de combustion libèrent du chrome dans les cendres sous foyer, en particulier quand la température de combustion est importante (source COFELY).

#### 2.4.1 INCIDENCE DU LA TAILLE DE L'INSTALLATION

L'IRDA, institut de recherche et de développement en agroenvironnement du Québec, a récemment mené des études sur les émissions de particules et la production de cendres issues de la combustion de biomasses. Les études suivantes apportent des informations sur la qualité des cendres et sur les possibilités d'incorporation dans le ciment. L'IRDA a notamment mené des travaux sur l'incidence de la taille de l'installation sur la composition des cendres.

**Tableau 23 : Comparaison des cendres de bois et de saule selon la capacité de l'installation<sup>21</sup>**

	Bois			Saule		
	17,58	293	1000	17,58	293	1000
Capacité (kW)						
Type	grille	grille	grille	grille	grille	grille
<b>Fertilisants (% b.s.)</b>						
<b>N</b>	0,3	0,29	0,05	0,3	0,09	0,01
<b>CaO</b>	19,7	23,72	35,69	30,2	18,10	41,73
<b>MgO</b>	3,7	3,75	3,80	3,6	2,40	4,44
<b>K<sub>2</sub>O</b>	5,0	6,72	7,04	11	5,86	12,10
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	1,8	1,89	4,83	5,1	2,19	7,00
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	1,1	0,37	0,24	1	0,31	0,45
<b>Métaux lourds (% b.s.)</b>						
<b>Cu</b>	0,03	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02
<b>Zn</b>	0,14	0,04	0,01	0,19	0,07	0,01
<b>Co</b>	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
<b>Mo</b>	.	0,00	0,00	.	0,00	0,00
<b>Ni</b>	0,08	0,02	0,01	0,02	0,01	0,00
<b>Cr</b>	0,17	0,02	0,01	0,04	0,02	0,00
<b>Pb</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Cd</b>	.	0,00	0,00	.	0,00	0,00
<b>V</b>	0,00	.	.	0,00	.	.
<b>Sr</b>	0,05	0,09	0,10	0,08	0,06	0,11
<b>Zr</b>	0,01	.	.	0,02	.	.
<b>Nb</b>	0,00	.	.	0,00	.	.
<b>Ba</b>	0,13	0,18	0,10	0,09	0,09	0,11
<b>Autres (% b.s.)</b>						
<b>C</b>	41,7	31,30	4,55	13,1	8,74	1,04
<b>Cl</b>	0,1	0,04	0,02	0,1	0,02	0,00
<b>SiO<sub>2</sub></b>	6,7	.	.	17,2	.	.
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1,5	1,33	2,88	3,1	1,12	3,24
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	4,2	2,23	9,75	1,7	2,16	1,98
<b>MnO</b>	1,79	1,24	0,33	0,3	0,58	0,38
<b>SO<sub>3</sub></b>	1,4	0,53	1,58	1,7	0,69	1,65
<b>B<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	.	0,09	0,09	.	0,05	0,06

Selon l'IRDA, plus la capacité de l'appareil est grande, moins il reste de C, de Cl et de N dans les cendres. Les imbrulés sont en quantité supérieure dans les petites installations : le COT est réhibitoire dans la perspective d'une valorisation dans l'industrie cimentière par exemple.

Pendant la combustion, l'azote s'oxyde en composé gazeux (NOx et N<sub>2</sub>O). Comme le four de plus grande capacité entraîne une meilleure combustion, l'azote est mieux oxydé et il en reste donc moins dans les cendres.

<sup>21</sup> Bilan énergétique, émissions gazeuses et particulières de la combustion de la biomasse à la ferme. Mars 2012

## 2.4.2 INCIDENCE DU MODE DE TRAITEMENT DES FUMÉES

Le mode de traitement des fumées peut avoir une influence sur la qualité des cendres produites : dépoussiéreur seul, dépoussiéreur associé à un filtre à manche, dépoussiéreur associé à un électro-filtre. Il n'y a toutefois pas de retour d'information sur l'incidence du traitement de fumée sur la qualité des cendres.

## 2.4.3 INCIDENCE DES MODALITÉS DE RÉCUPÉRATION DES CENDRES

### 2.4.3.1 Extraction des cendres sous foyer

Selon la taille de l'installation, le mode de récupération peut être différent. Ainsi, sur les chaufferies collectives au bois de plus d'1 MW, les cendres sous grilles sont en général mélangées aux cendres de multi-cyclone. De plus, les cendres sous foyer sont en général collectées par voie humide, ce qui modifie leur composition physico-chimique : teneur en MS plus faible, forme  $\text{Ca(OH)}_2$  (chaux éteinte) davantage présente.

L'humidification entraîne une extinction d'une partie de la chaux vive : en théorie, il faut 1/3 d'eau pour éteindre 1 de  $\text{CaO}$ . En pratique un excès d'eau est souvent nécessaire pour éteindre toute la chaux vive. Dans le cas des cendres de chaufferie, l'humidification est pratiquée principalement pour réduire la température des cendres et pour les rendre moins pulvérulentes, l'extinction de la chaux n'est pas l'objectif et son effet est modeste.

**Remarque :** L'extinction de la chaux ( $\text{CaO} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$ ), puis dans un second temps sa carbonatation ( $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$ ) entraînent une augmentation de la masse de la chaux ( $1 \text{ CaCO}_3 = 1,8 \text{ CaO}$ ) et donc des cendres, accompagnée d'une dilution des autres éléments, et notamment des éléments-traces.

Les cendres sous foyer sont généralement collectées avec les cendres de multi-cyclone. Les analyses réalisées montrent qu'elles respectent les seuils définis pour une valorisation agronomique par plan d'épandage agricole.

### 2.4.3.2 Cendres sous foyer mélangées ou non aux cendres de dépoussiérage

Les cendres issues du dépoussiérage sont de manière très majoritaire mélangées aux cendres sous foyer. Ces cendres grossières, issues de multicyclones en général, sont davantage concentrées en éléments-traces que les cendres produites sous la grille. Il existe très peu de retours d'analyses permettant de comparer la composition de ces deux types de cendres. Si les cendres issues du dépoussiérage dégradent globalement la qualité du mélange final, on peut cependant rappeler que :

- les cendres actuellement produites sont quasi exclusivement collectées en mélange,
- le mélange permet l'extinction des cendres grossières et évite les incendies,
- les cendres grossières apportent de l'ordre de 20 % des éléments fertilisants du mélange,
- les cendres en mélange respectent très majoritairement les seuils de l'épandage en France.

## 2.4.4 INCIDENCE DE LA CONDUITE DE L'INSTALLATION

Une conduite non performante de l'installation de combustion (réglages, fonctionnement en régime réduit...) peut aboutir notamment à la production de mâchefers.

## 2.4.5 INCIDENCE DES TECHNIQUES DE POST-TRAITEMENT (MELANGES, BROYAGE)

Les post-traitements parfois nécessaires pour répondre aux exigences de certaines applications influent sur la qualité des cendres. On peut citer :

- Broyage criblage déferailage (retour au sol, valorisation matière) : réduction/élimination des mâchefers, élimination des métaux ferreux (clous principalement), réduction granulométrique ;
- Mélange à des boues ou à des composts (retour au sol), à des liants hydrauliques routiers... ;
- Humidification (retour au sol en forêt ou en agriculture) : réduction du caractère pulvérulent, extinction de la chaux vive ;
- Granulation (retour en forêt) ;
- Extinction de la chaux vive : transformation du  $\text{CaO}$  en  $\text{Ca(OH)}_2$  ;
- Maturation (avant enfouissement en décharge de classe 1) : diminution de la solubilité.

### 3 Principaux effets recherchés des cendres de biomasse selon les applications

On peut résumer les principaux effets recherchés des cendres de biomasse suivants :

**Tableau 24 : Synthèse des principaux effets recherchés des cendres de biomasse**

Effets recherchés	Applications
Caractère fertilisant (P, K, MgO...)	Retour au sol agriculture et forêt
Caractère neutralisant/stabilisant	Retour au sol agriculture et forêt Traitement de déchets Traitement de sol
Rigidité pour les végétaux (silice)	Retour au sol agriculture et forêt
Caractère pouzzolanique	Incorporation des ciments, bétons
Remplissage/charge (porosité, granulométrie, densité) (filler)	Correcteur granulométrique dans les bétons et mortiers Céramiques, plastiques... Comblement/aménagement de mines, de carrières, de décharge
Apports de fondants alcalins, coloration	Céramiques

# Volet 3 : Evaluation des gisements et des modes de valorisation actuellement mise en œuvre

## 1 Evaluation des gisements

### 1.1 Méthode

Pour estimer les flux de cendres, sous foyer et volantes, on procède en analysant :

- Les flux de bois consommés en installations de combustion, par nature de bois
- Les taux de cendres par type de combustibles

L'analyse prend en compte les perspectives de développement des chaufferies en Europe à l'horizon 2020 pour affiner les flux de cendres associés.

L'analyse est complétée par les données issues de la littérature.

### 1.2 Focus sur deux gisements hors champ de l'étude

#### 1.2.1 CENDRES DE BOIS ISSUS DU CHAUFFAGE DOMESTIQUE

En France, en 2012, la consommation de bois bûche s'est élevée à 33,8 millions de m<sup>3</sup><sup>22</sup>, soit environ 30 millions de tonnes de bois. Cette consommation domestique aboutit à la production de **300 000 à 400 000 tonnes de cendres** par les ménages.

Les 7 millions de foyers se chauffant au bois sont équipés majoritairement d'un insert (47 %), d'un poêle à bûches (24 %), d'un foyer ouvert (17 %). Il se vend de l'ordre de 500 000 équipements par an dont 300 000 poêles et 20 chaudières.

Ces cendres sont évacuées avec les ordures ménagères ou valorisées comme amendement et fertilisants dans les jardins des particuliers.

Les cendres issues des équipements domestiques ont une composition proche des cendres issues des installations collectives consommant des plaquettes forestières.

#### 1.2.2 CENDRES DE CHARBON<sup>23, 24, 25</sup>

##### 1.2.2.1 Caractéristiques

Résidu de la combustion du charbon pulvérisé, les cendres volantes constituent une matière première intéressante pour la fabrication de certains ciments, voire pour la formulation de bétons. Explications.

Selon les types de charbon et le type de chaudière utilisés, on obtient des cendres volantes de différentes natures – siliceuses, silico-calciques ou calciques – avec des propriétés pouzzolaniques et/ou hydrauliques latentes. Ces trois types de cendres volantes sont utilisés dans la production de bétons et de ciments composés dans certains pays européens, en fonction de l'expérience et de la tradition nationale.

La cendre **volante siliceuse** est constituée principalement de particules sphériques vitrifiées ayant des propriétés pouzzolaniques. La cendre **volante calcique** est une poudre fine ayant des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques. Composée essentiellement de chaux réactive (supérieure à 5 % en masse), de silice réactive et d'alumine. Le restant contient de l'oxyde de fer et d'autres oxydes. La quantité de la chaux (CaO) dans ce type de cendres est élevée, c'est pourquoi elles sont susceptibles de faire prise sans liant, seulement au contact de l'eau (d'où leur nom : cendres hydrauliques) et dégagent de la chaleur en s'hydratant.

##### 1.2.2.2 Principales applications

En cimenterie, les cendres volantes sont utilisées pour la préparation de la matière première (le cru). Elles apportent essentiellement la silice, l'alumine et le fer. Elles peuvent être ajoutées lors du broyage final (avec le clinker, le gypse et les éventuels autres constituants secondaires). Leur passage dans le broyeur augmente le rendement de ce dernier (grâce aux imbrûlés).

---

<sup>22</sup> ADEME. Etude sur le chauffage domestique. 2012

<sup>23</sup> <http://www.acpresse.fr>

<sup>24</sup> <http://doc.lerm.fr/emploi-cendres-volantes-en-technique-routiere/>

<sup>25</sup> Guides d'utilisation des matériaux lorrains en technique routière. Guide cendres.

Les cendres utilisées dans le béton doivent répondre aux exigences de la norme européenne EN 450 - 1 – cendres volantes dans le béton. Les cendres siliceuses sont conformes à cette norme.

Sur le béton frais, les cendres contribuent à améliorer l'ouvrabilité, augmentent la compacité, améliorent l'aspect de surface après décoffrage et allègent les produits préfabriqués (pour un taux de cendres supérieur à 7 %).

Sur le béton durci, elles augmentent la résistance mécanique finale (en raison de leur pouvoir pouzzolanique), diminuent la fissuration (en relation avec la diminution de la chaleur d'hydratation), accroissent la résistance aux eaux pures et aux eaux sulfatées, assurent une meilleure résistance au feu et aux chocs thermiques et minorent la réaction alcali-silice.

### 1.2.2.3 Les autres voies d'utilisation des cendres volantes

En dehors des utilisations classiques comme les ajouts dans le ciment ou pour permettre la formulation de certains bétons, les cendres volantes trouvent aussi des applications dans d'autres domaines de la construction. Elles peuvent être employées pour la réalisation de liants hydrauliques routiers, en terrassement pour la création de remblais, de couches de formes ou de couches de chaussées (fondations et bases). A ce niveau, les cendres permettent en particulier d'améliorer les caractéristiques mécaniques des sols en place. Enfin, les cendres permettent la formulation de coulis d'injection destinés à la stabilisation des sols.

### 1.2.2.4 Gisement

EDF estime sa production de cendres entre **400 et 800 000 tonnes annuelles**, et les stocks dus aux anciennes centrales à **9 millions de tonnes en 2006**, sur l'ensemble du territoire<sup>26</sup>. A ces tonnages s'ajoutent principalement ceux de la Société nationale d'électricité et de thermique (Snet), qui exploite 4 centrales en France.

Les centrales à charbon consomment 6,3 millions de tep de charbon en 2013 (INSEE), soit 9 millions de tonnes de charbon.

## 1.3 Gisements de cendres de biomasse issues des installations de combustion collectives et industrielles

### 1.3.1 BOUES D'EPURATION

A l'échelle européenne, la production de boues d'épuration issues de l'assainissement collectif s'élève à près de 10 000 000 t de MS.

A l'échelle européenne, une étude<sup>27</sup> fournit des informations précises sur les pourcentages de boues incinérées par pays. Les quantités de cendres volantes générées au cours de l'incinération des boues sont de l'ordre de 2 à 3 % en masse de la quantité de boues introduites dans l'incinérateur [Rand et al, 2000].

En France, la production de cendres de boues est estimée à 4 000 tonnes.

La production de cendres en Europe, sur la base d'un taux de cendres de 2 %, s'élève à 30 000 tonnes en 2010, avec une projection à 70 000 tonnes pour 2020.

### 1.3.2 INSTALLATIONS DE COMBUSTION DE GRANULES

Selon l'Aebiom (European Biomass Association), dans l'Union européenne, la consommation de granulés a atteint 15,1 millions de tonnes en 2012 pour une production estimée à 10,5 millions de tonnes (9,5 millions de tonnes en 2011), ce qui signifie qu'environ 30 % de la consommation européenne est importée<sup>28</sup>. Le tableau<sup>29</sup> suivant confirme et précise ces données.

**Tableau 25 : Consommation de granulés en Europe**

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Capacité	6 643 000	8 583 000	11 283 000	13 694 000	14 845 000	15 500 000	16 000 000	16 200 000	16 400 000
Production	520 000	5 782 000	6 294 000	6 669 000	9 241 000	9 620 000	10 000 000	10 150 000	10 300 000
Importations	800 000	900 000	1 250 000	1 771 000	2 610 000	3 226 000	4 490 000	6 000 000	7 000 000
Consommation	4 603 000	6 028 000	7 021 000	9 000 000	11 400 000	13 000 000	14 300 000	16 000 000	17 100 000
Production de cendres	23 015	30 140	35 105	45 000	57 000	65 000	71 500	80 000	85 500

<sup>26</sup> <http://www.journaldelenvironnement.net/article/les-cendres-de-charbon-reviennent-sur-le-devant-de-la-scene,10474>.

<sup>27</sup> RPA. Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land. Part II: Report on Options and Impact. 2008

<sup>28</sup> Observ'ER. État des Énergies renouvelables en Europe. Edition 2013.

<sup>29</sup> <http://forinvest-ba.fr/la-consommation-europeenne-de-granules-devrait-tripler-dici-2020>

La production de cendres, sur la base d'un taux de cendres de 0,5 %, s'élève à 85 500 tonnes en 2014.

Les prévisions de consommation de granulés pour 2020 sont comprises entre 35 millions de tonnes pour l'Europe occidentale (source Pöyry) à 50-80 millions de tonnes pour le total de l'UE (source AEBIOM). La consommation future dépendra notamment des politiques en faveur du développement de ce type d'énergie.

Ainsi, à l'horizon 2020, la production de cendres pourrait s'élever entre 175 000 tonnes pour l'Europe occidentale à 400 000 tonnes pour le total de l'UE.

### 1.3.3 CHAUFFERIES COLLECTIVES, INDUSTRIELLES ET COGENERATION

#### 1.3.3.1 France

Définition biomasse solide : la biomasse solide, qui regroupe le bois, les déchets de bois, les granulés et autres déchets végétaux ou animaux, joue un rôle croissant dans la production de chaleur et d'électricité de l'Union européenne.

Les données, sauf indication contraire, excluent :

- l'incinération des déchets,
- la méthanisation,
- les biocarburants.

En 2012, la production d'énergie finale par la **biomasse solide** s'élève à 10 Mtep pour (+ 1 à 1,1 Mtep pour les déchets urbains) (sources de 2013<sup>30</sup> et<sup>31</sup>) avec un objectif à 15 Mtep (donc hors déchets urbains).

Sur ces 10 Mtep, 7,4 Mtep concernent le bois de feu domestique et donc 2,6 Mtep le « bois énergie » non domestique (dont 0,45 Mtep pour les granulés).

A l'horizon 2020, l'objectif fixé en France pour le « bois énergie domestique » stagne à 7,4 Mtep : c'est donc l'augmentation de consommation de bois énergie non domestique qui doit permettre d'atteindre 15 Mtep, avec un objectif de 7,9 Mtep, soit une augmentation dans ce secteur de 5,3 Mtep entre 2012 et 2020 (soit l'équivalent de 22 millions de tonnes).

Objectif biomasse France 2020<sup>32</sup> : 16,5 millions de tep dont :

- Bois de feu domestique : 7,4 Mtep
- Bois énergie autre : 5,5 Mtep dont 3,2 Mtep dans l'industrie
- Cogénération biomasse : 2,4 Mtep
- Total hors déchets et biogaz : 15,3 Mtep dont 7,4 Mtep pour bois domestique et 7,9 Mtep pour le bois énergie non domestique.

On peut préciser que les chaufferies au bois représentent aujourd'hui un parc d'environ 5 000 installations dont 1 500 dans le domaine industriel. Ces installations représentent une consommation de **6 millions de tonnes**, dont 5 millions de tonnes pour les 640 installations (dont 111 BCIAT) soutenues dans le cadre du fond chaleur entre 2009 et 2014.

En 2015, 28 installations de cogénération biomasse (CRE) sont en fonctionnement pour une puissance électrique installée de 303 MW<sup>33</sup> et une consommation de combustibles estimé à plus de 2 millions de tonnes. Les projets en construction représentent une puissance électrique installée de 245 MW, soit une consommation de biomasse estimée de 2 millions de m<sup>3</sup>. On retient le chiffre de 4 millions de tonnes pour la cogénération (y compris projets en construction).

Toutefois, la France connaît un coup d'arrêt assez brutal depuis 2014, malgré la relance d'un appel d'offre (« CRE 5 ») pour la fin de l'année 2015, et certains projets sont d'ores et déjà abandonnés.

Le tableau suivant précise les données pour l'ensemble des ENR<sup>34</sup>.

---

<sup>30</sup> Observ'ER. État des Énergies renouvelables en Europe. Edition 2013.

<sup>31</sup> MEDDE. Rapport sur les progrès réalisés dans la promotion et l'utilisation des énergies renouvelables. Décembre 2013

<sup>32</sup> MEDDE. Plan d'action national en faveur des énergies renouvelable. Période 2009-2020.

<sup>33</sup> Observ'er. Filière biomasse solide. 2014.

<sup>34</sup> MEDDE. EVALUATION PROSPECTIVE 2020-2050 DE LA CONTRIBUTION DU SECTEUR BIOMASSE ENERGIE AUX EMISSIONS NATIONALES DE POLLUANTS ATMOSPHERIQUES. Synthèse. Novembre 2009.

**Tableau 26 : Objectifs 2012-2020 définis en termes de consommation par le COMPO en France**

Energie	Situation 2006	Horizon 2012		Horizon 2020	
		Objectif au 31/12/2012	Supplément à réaliser	Potentiel 2020	Supplément à réaliser
Bois individuel	7400 (5,75 Mlogts)	7400 (7,3 Mlogts)	0 (1,55 Mlogts)	7400 (9 Mlogts)	0 (3,25 Mlogts)
Biomasse	<b>1 400</b>	<b>2 500</b>	<b>1 100</b>	<b>5 200</b>	<b>3 800</b>
dont bâtiments	100	300	200	800	700
dont réseaux de chaleur collectif/tertiaire	100	300	200	1 200	1 100
dont industrie/process	1 200	1 900	700	3 200	2 000
Biomasse chaleur cogénération	0	540	540	2 400	2 400
Géothermie profonde	130	195	65	500	370
Géothermie intermédiaire	50	100	50	250	200
Pompe à chaleur individuelle	200 (0,075 Mlogts)	1 200 (1,245 Mlogts)	1 000	1 600 (2,0 Mlogts)	1 400
Solaire thermique individuel	17 (0,085 Mlogts)	150 (0,730 Mlogts)	133 (0,645 Mlogts)	817 (4,285 Mlogts)	800 (4,2 Mlogts)
Solaire collectif	10	35	25	110	100
Part ENR des UIOM et bois DIB	400	470	70	900	500
Biogaz	55	60	5	555	500
<b>Total</b>	<b>9 662</b>	<b>12 650</b>	<b>2 988</b>	<b>19 732</b>	<b>10 070</b>

Mlogts : millions de logements

L'objectif total retenu de 16 455 ktep en 2020 se décompose en sous-objectifs pour les filières suivantes :

- **bois individuel** : en 2005, la consommation de bois par les particuliers représentaient 6 549 ktep. L'objectif est d'accroître ce chiffre à 7 400 ktep en 2020 tout en augmentant considérablement le nombre de logements chauffés au bois-énergie de 5,75 millions à 9 millions. Cette augmentation du parc plus rapide que la consommation provient d'un remplacement des appareils existants par des appareils présentant un meilleur rendement et par la diminution des besoins de chauffage des logements (rénovation thermique dans l'existant et nouvelle réglementation thermique dans le neuf).
- **biomasse dans les secteurs de l'habitat collectif, du tertiaire et de l'industrie** : la PPI retient un objectif de 5 200 ktep de chaleur renouvelable produite à partir de biomasse à destination de ces secteurs en 2020. Le secteur industriel représente la majeure partie de ce développement avec un objectif de 3 200 ktep.
- **chaleur provenant de cogénération biomasse** : l'objectif fixé par la PPI est d'atteindre 540 ktep en 2012 et 2 400 ktep en 2020, à partir d'une production quasi-nulle en 2005.

La consommation de granulés en 2014 représente une énergie finale de 0,45 million de tep (900 000 tonnes de granulés) en France. Elle représente donc 6 % (0,45/7,9) de l'objectif de 7,9 Mtep pour le « bois énergie » non domestique.

#### 1.3.3.2 Production de cendres (sous foyers, traitement des fumées)

Tonnes de cendres biomasse solide non domestique :

2014 : 10 millions tonnes de combustibles (2,6 Mtep dont 0,45 Mtep pour les granulés), **soit de l'ordre de 200 000 tonnes de cendres**, dont 170 000 tonnes hors granulés.

2020 : 33 millions de tonnes de combustibles (7,9 Mtep), **soit 600 000 de tonnes de cendres**. Toutefois, cet objectif semble peu atteignable compte tenu de la dynamique actuelle de la filière : ainsi **le CIBE table sur 300 000 tonnes de cendres à cet horizon**.

## 1.4 UE

### 1.4.1 EN 2012

Dans l'UE en 2012, la consommation de biomasse solide représente une production d'énergie finale de 85,6 Mtep (source <sup>35</sup>), dont 8,8 millions de tep pour les granulés (15 000 000 tonnes de granulés).

Sur les 85,6 Mtep, 67,4 Mtep concernent la production de chaleur seule et 18,2 Mtep pour la production d'électricité seule ou en cogénération.

Les 67,4 Mtep (chaleur) se répartissent entre bois de feu domestique, chaufferies dédiées et collectives et industrie.

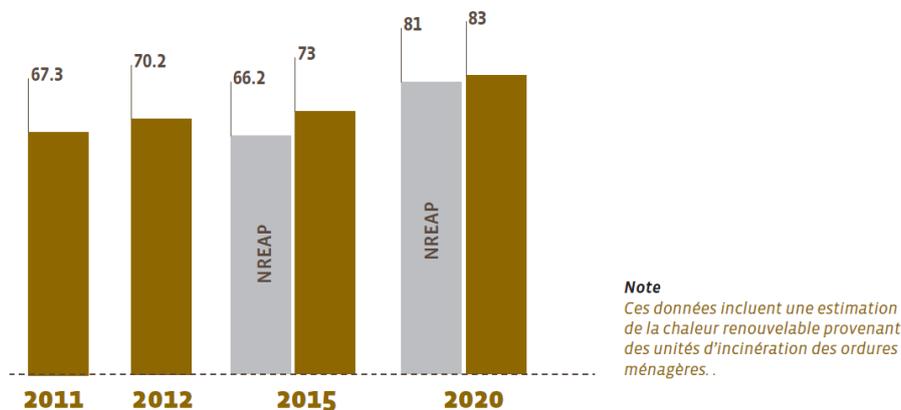
Si l'on est capable de distinguer les différents usages en France, l'exercice est beaucoup plus délicat en Europe.

<sup>35</sup> Observ'ER. État des Énergies renouvelables en Europe. Edition 2014.

## 1.4.2 OBJECTIF 2020

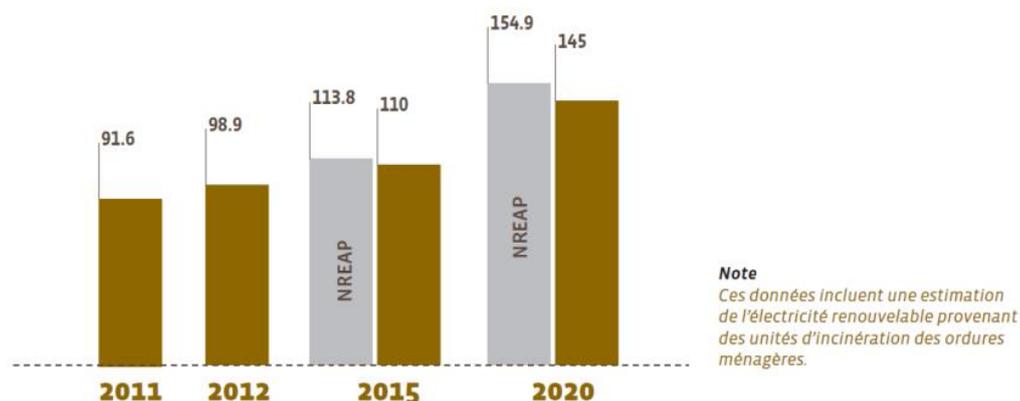
Pour la chaleur, à l'horizon 2020, la tendance aboutit à 83 Mtep, estimée à **80 Mtep** hors incinération.

**Tableau 27 : Tendance actuelle de la consommation de chaleur issue de bio-masse solide par rapport à la feuille de route des PNAER (en TWh).** (Source Observ'ER 2013).



Pour l'électricité, à l'horizon 2020, la tendance aboutit à 145 TWh, soit 12,4 Mtep, soit 126 TWh hors incinération, soit une consommation primaire de 350 TWh (rendement 36 %), soit **30 Mtep** (18,2 Mtep en 2012).

**Tableau 28 : Tendance actuelle de la production d'électricité issue de biomasse solide par rapport à la feuille de route des PNAER (en TWh).** (Source Observ'ER 2013).



Au total en 2020 la consommation d'énergie finale issue de biomasse solide (hors déchets urbains, hors biocarburants, hors méthanisation) pourrait s'élever à **110 Mtep** (80 + 30), soit l'équivalent de **400 à 450 Mt de combustibles** issus de biomasse solide.

Une partie de ces combustibles est utilisée directement en bois de feu par les particuliers. En l'absence de données chiffrées dans ce domaine, on part des hypothèses suivantes, en s'appuyant sur les données précises en France :

- 2014 : le bois de feu représente 75 % de la consommation biomasse solide hors cogénération
- 2020 : le bois de feu représente 55 % de la de la consommation biomasse solide hors cogénération (stagnation consommation bois de feu et augmentation globale consommation biomasse solide : la part du bois de feu diminue)

Ainsi, on estime les consommations suivantes pour la biomasse solide :

- Biomasse solide tous usages hors bois de feu domestique
  - 2014 : 35 Mtep (25 % x 67,4 + 18,2) → Equivalence : 150 Mt de bois
  - 2020 : 66 Mtep (45 % x 80 + 30) → Equivalence : 270 Mt de bois
- Bois de feu domestique
  - 2012 : 50 Mtep
  - 2020 : 50 Mtep → Equivalence : 200 Mt de bois

Le chiffre bois de feu (200 Mt de bois) est cohérent avec le nombre d'appareils au bois pour particuliers (cheminées, poêles et cuisinières) qui s'élève à 65 millions d'unités en Europe (source <sup>36</sup>) dont 15 millions en Allemagne, 7,5 millions en France, 1,2 million en Norvège, avec un ratio de 3 tonnes/appareil, soit 6 stères/appareil.

### 1.5 Production de cendres (sous foyers, traitement des fumées)

Tonnes de cendres issues de biomasse solide hors bois de feu : chaufferies dédiées et collectives, industrie, cogénérations :

- 2014 : 145 millions tonnes de combustibles (35 Mtep dont 8,8 Mtep pour les granulés), **soit entre 2,8 millions de tonnes de cendres**
- 2020 : 270 millions de tonnes de combustibles (66 Mtep), **soit entre 5,5 millions de tonnes de cendres.**

### 1.6 Synthèse

L'évaluation des flux de cendres est complexe car elle repose sur des informations qui manquent de précision (typologie retenue, nombre d'installations, quantité de biomasse, taux de cendres). On peut indiquer les ordres de grandeur suivants :

- France :
  - 2014 : 200 000 t brutes
  - 2020 : 300 000 t brutes (objectif 600 000 t brutes)
- Europe :
  - 2014 : 2,8 Mt brutes
  - 2020 : 5,5 Mt brutes (objectif lié à la valorisation énergétique de la biomasse hors biogaz)

---

<sup>36</sup> European Biomass Statistics, AEBIOM 2010, Reference year: 2007; LOT 15 Preparatory study, Bio Intelligence Service, 2012

## **2 Etat des lieux des modes de valorisation actuels des cendres brutes ou post-traitées**

### **2.1 Introduction**

En France et en Europe, les cendres de biomasse suivent les deux principales voies de traitement suivantes :

- Majoritairement le stockage en installation de stockage de déchets non dangereux et en stockage de déchets dangereux,
- Le retour au sol en agriculture, et de manière plus marginale comme produit chaulant en forêt dans 3 ou 4 pays.

Les alternatives à ces exutoires sont marginales et principalement au stade de la recherche et développement. Quelques cendres volantes sont utilisées comme matière première dans l'industrie de la brique et du ciment dans quelques pays. Certaines cendres sont utilisées en techniques routières (notamment en France où certaines cendres de papèteries bénéficient d'une APV) et en tant que matériaux de substitution dans les bétons, ou en tant que matériau dans l'aménagement des installations de stockage.

Les statistiques font défaut sur les quantités de cendres actuellement éliminées en enfouissement et les valorisations dans les différentes filières potentielles, essentiellement béton, génie civil, céramique et épandage (agriculture dont co-compostage, forêt).

### **2.2 Stockage (enfouissement)**

Dans de nombreux pays, la plupart des cendres sont encore évacuées en installations de stockage compte tenu des contraintes qui pèsent sur les autres modes de valorisation. Les coûts de la décharge sont encore dans de nombreux pays plutôt bas (50-80 €/t y compris les taxes) et peu incitatifs pour développer de nouvelles voies de valorisation.

Compte tenu de leurs caractéristiques, au regard notamment des tests de lixiviation, les cendres sous foyer sont plutôt évacuées en ISDND et les cendres volantes en ISDD, même si ces dernières ne sont pas des déchets dangereux au sens de la nomenclature sur les déchets.

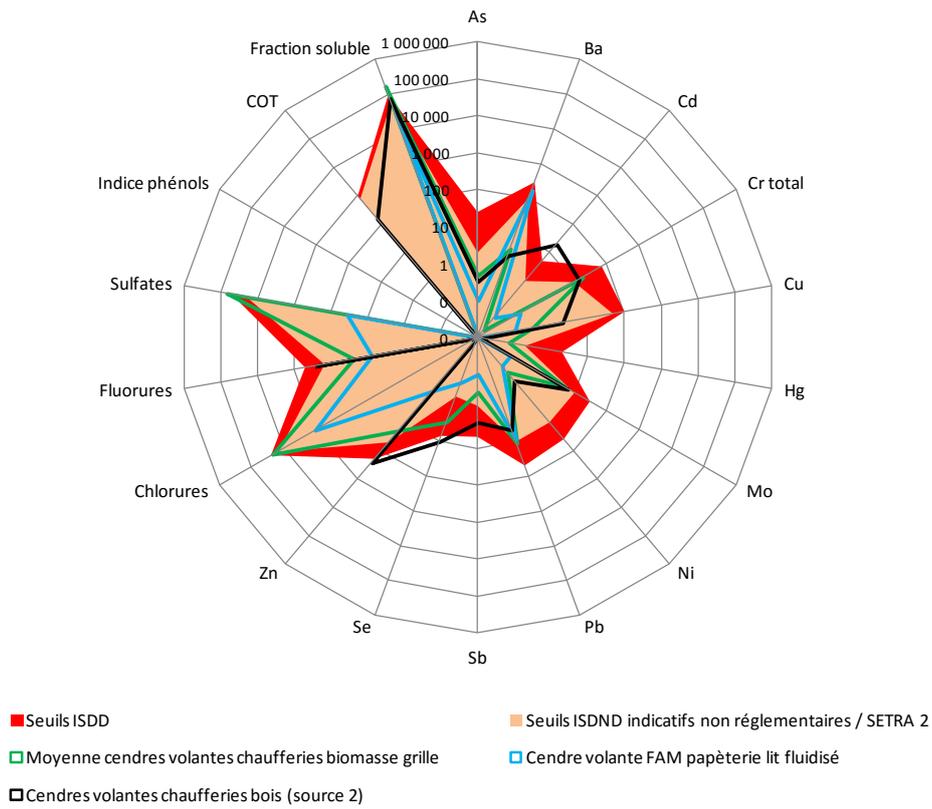
Les graphiques suivants fournissent des indications sur la qualité des cendres volantes et sous foyer au regard des seuils retenus pour l'enfouissement de déchets non dangereux (ISDND) et de déchets dangereux (ISDD).

Les principaux enseignements sont les suivantes :

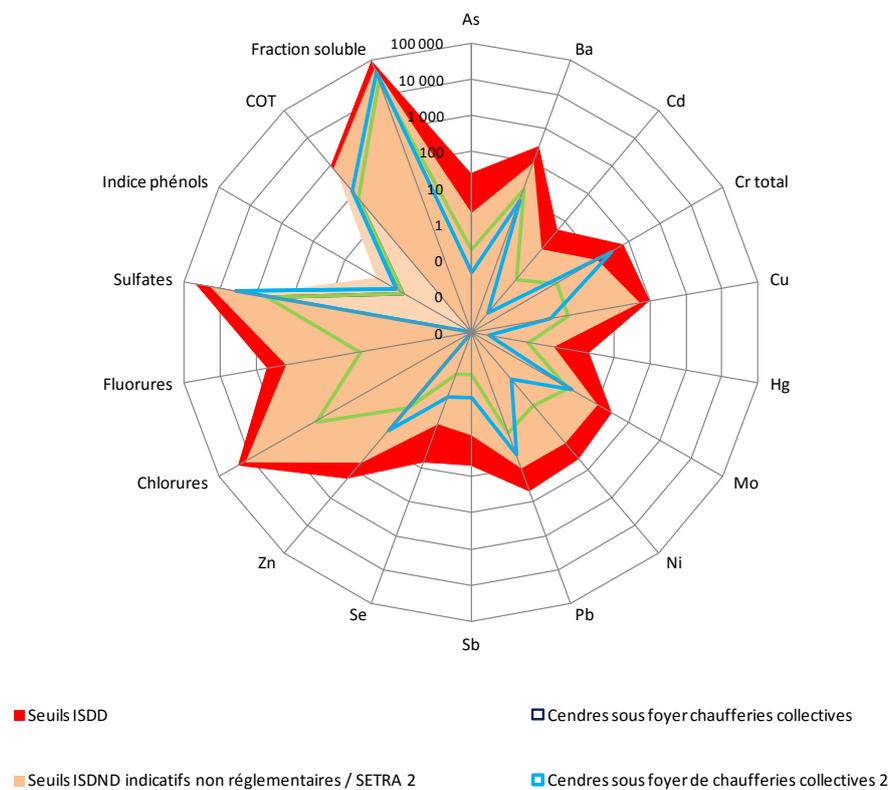
- Les cendres volantes respectent les seuils de lixiviation ISDD, avec quelques dépassements (notamment fraction soluble) qui peuvent nécessiter une stabilisation préalable
- Les cendres sous foyer respectent les seuils de lixiviation couramment admis sur les ISDND.

On rappelle que les cendres volantes peuvent être enfouies en ISDND, si elles respectent les exigences imposées par l'installation.

**Figure 5 : Situation de différentes cendres volantes au regard des seuils à la lixiviation de la réglementation stockage déchets dangereux**



**Figure 6 : Situation de différentes cendres sous foyer au regard des seuils à la lixiviation couramment admis dans la réglementation stockage déchets non dangereux**



## 2.3 Retour au sol

### 2.3.1 AGRICULTURE

#### 2.3.1.1 Europe

Les cendres, principalement sous foyer, sont épandues en agriculture seules, après un traitement plus ou moins poussé (criblage, broyage). L'épandage des cendres de biomasse sur sols agricoles est autorisé dans presque toute l'Europe (exception en Belgique, Pays-Bas), avec des contraintes plus ou moins importantes selon les pays.

Les cendres sont également incorporées dans des composts, notamment en Autriche. En France, jusqu'en 2010, l'incorporation des cendres aux composts de déchets verts sans remettre en cause le statut de produit normalisé, était tolérée et était une pratique très courante : désormais, la norme NF U 44 051 n'autorise plus l'incorporation de cendres végétales. Depuis 2010 donc, le retour au sol des cendres implique la réalisation d'un plan d'épandage.

Les cendres volantes sont souvent interdites à l'épandage. En France, les cendres volantes issues des installations de combustion sont interdites à l'épandage.

En France, dans plus de la moitié des départements français, une structure (organisme indépendant) a été mise en place sous la tutelle des chambres d'agriculture (MVAD...) pour suivre les épandages de sous-produits industriels et issus des collectivités. L'APCA (assemblée permanente des chambres d'agriculture), sollicitée dans le cadre de l'étude n'a pas souhaité coopérer et fournir des informations.

On peut noter toutefois que l'épandage est davantage privilégié pour les chaufferies collectives ou pour les installations de très grande taille, et moins dans le secteur de l'industrie du bois ou les cendres sont majoritairement enfouies en décharge.

Il n'existe pas de chiffres précis sur les flux de cendres épandues en agriculture mais on peut les estimer sur la base d'informations fournies par les exploitants et le CIBE à **70-80 % des flux de cendres sous foyer**.

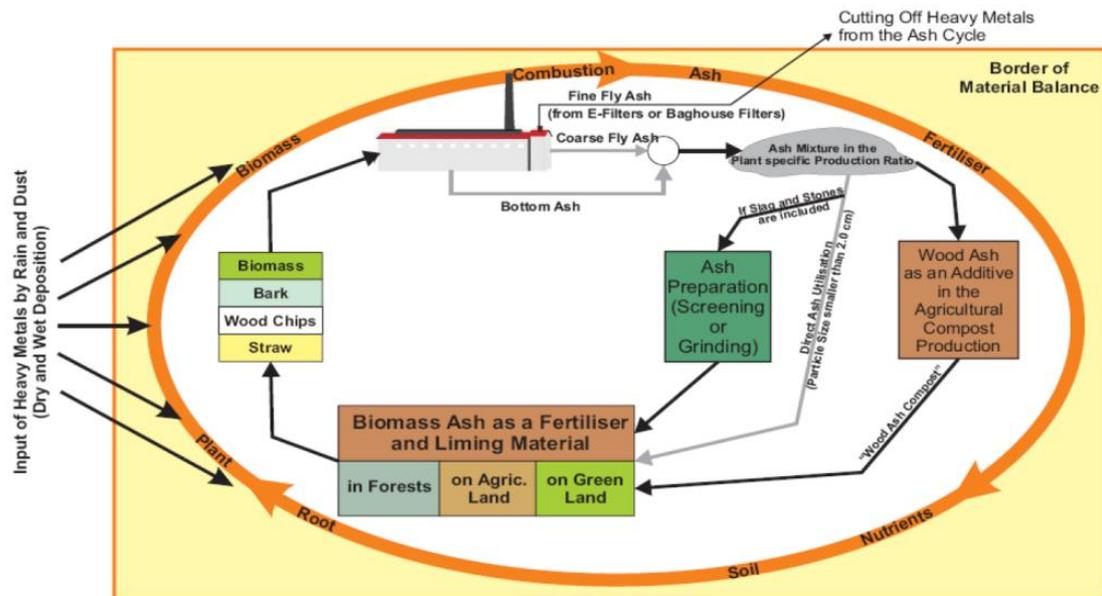
En général, l'épandage des cendres en mélange (cendres sous grilles et cendres multi-cycloniques sont autorisées mais il existe des exceptions ; par exemple, en Allemagne, le retour en forêt concerne les cendres sous grilles seules, ou en Suisse.

En France, les arrêtés « combustion » du 26 août 2006, proscrivent l'épandage des cendres sous grilles et issues de multi-cyclone en mélange : pourtant selon la filière, plus de 95 % du parc de chaufferies actuel (environ 2 000 installations) produit des cendres dites « **sous foyer** », comportant différents types de cendres : cendres sous grilles, cendres issues du multi cyclone, cendres issues d'économiseurs, cendres issues d'open-pass, cendres issues des réchauffeurs d'air... Seules les cendres issues du traitement des gaz (cendres volantes) sont systématiquement séparées des cendres sous grilles. Il existe un risque réel que les cendres sous foyer actuellement épandues en agriculture (au moins 100 000 tonnes/an) soient enfouies en décharge : ce seraient ainsi 25 000 tonnes de chaux et plusieurs milliers de tonnes de fertilisants qu'il faudrait compenser par des engrais du commerce.

Dans le cadre du programme de R&D Autrichien « BIOS BIOENERGISYSTEM », Obernberger et Supanic (2009) précisent :

- « La coupure entre cendre volantes et cendres multi-cycloniques est plus pertinente écologiquement et économiquement »
- « si un mélange de cendres sous foyer et multi-cyclonique est utilisé, un meilleur cycle des nutriments peut être obtenu »

Figure 7 : Principe d'une utilisation durable des cendres de biomasse <sup>37</sup>



### 2.3.1.2 Pays nord-américains (Etats-Unis, Canada, Québec)

Selon RESOBIO, ces pays ont développé un usage en agriculture. Si nationalement, 90 % des cendres de bois produites sont enfouies (pour une production totale de cendres estimée à 3 millions de tonnes par an), les Etats du nord-est en recyclent en agriculture près de 80 %, mais seulement 10 % pour les Etats du sud est.

### 2.3.2 FORET

#### 2.3.2.1 France

En France cette solution est depuis quelques années à l'étude et autorisée depuis 2013 pour les cendres de biomasse d'installations de combustion d'une puissance inférieure à 20 MW.

Les épandages en forêt en France en 2015 ne concernent que des chantiers de démonstration.

#### 2.3.2.2 Europe

Les cendres sont utilisées comme amendement calcique dans des sols forestiers en Suède, en Autriche et en Allemagne.

##### 2.3.2.2.1 Pays scandinaves

Dans les pays scandinaves, les perspectives de montée en puissance de l'utilisation du bois comme biomasse énergie se sont traduites dès les années 1970 par la mise en œuvre d'actions de recherche en forêt sur les effets d'exportations accrues de biomasse sur les sols, et les solutions de compensation. C'est dans ce cadre qu'a été mis en place entre 1977 et 1986 le premier réseau expérimental multi-sites (22 dispositifs) sur épicéas et pins, comparant différentes modalités d'exportations et différents types de fertilisation<sup>38</sup>.

En Suède, en Finlande, une partie des cendres de biomasse sont donc épandues en forêt. La Suède et la Finlande disposent de guides spécifiques pour les épandages de cendres en forêt à l'usage des utilisateurs :

- depuis 2002 en Suède, avec un premier guide et une version simplifiée en anglais édités par Skogsstyrelsen (MEDDELANDE, 2002). Ce guide a été révisé en 2008 ;
- en 2012 en Finlande, avec également une version disponible en anglais (METLA, 2012).

La Suède a mené depuis le début des années 2000 plusieurs programmes sur la valorisation des cendres (pour les épandages, **mais aussi pour la fabrication de béton et dans cadre du génie civil**).

<sup>37</sup> OBERNBERGER I., SUPANIC K. Possibilities of ash utilisation from biomass combustion plant. Bios Bioenergiesysteme. 2009

<sup>38</sup> ADEME. ECOFOR. MAAF. Projet RESOBIO. Gestion des rémanents forestiers : préservation des sols et de la biodiversité. Mars 2014.

En suède, environ **36 000 tonnes de cendres** étaient épandues en forêt en 2012. En Finlande, au moins 15 000 tonnes de cendres sont épandues en forêt.

#### 2.3.2.3 Allemagne

Depuis les années 1980, l'Allemagne soutient des opérations d'épandage calco-magnésien pour restaurer des sols acidifiés ou en prévention de l'acidification des sols. Le centre de recherche (FVA) a organisé en mars 2002 un colloque intitulé « Epandage des cendres de bois en forêt, un concept basé sur le recyclage des éléments minéraux ». qui a dressé le bilan des connaissances scientifiques et techniques disponibles, et ouvert la discussion sur les conditions d'acceptabilité politique et sociétale de ce concept.

Les épandages en forêt restent marginaux en Allemagne et plutôt au stade de chantiers de démonstration, comme dans la région de Haute-Souabe.

#### 2.3.2.4 Autriche

Depuis 2011, l'Autriche a mis en place un guide signé par le Ministre de l'Agriculture, des Forêts, de l'Environnement et de l'Eau pour l'utilisation raisonnée des cendres de biomasse en agriculture et en forêt (Holzner, et Obernberger, 2011).

Bien qu'autorisé, ce mode de valorisation est peu développé en Autriche.

#### 2.3.2.5 Pays nord-américains (Etats-Unis, Canada, Québec)

Il n'existe pas de production scientifique récente dans ces pays sur des épandages de cendres en forêt. Les travaux sont plutôt anciens (années 1990).

### 2.4 Valorisation matière

Les cendres volantes sont utilisées comme matière première dans l'industrie de la brique et du ciment dans quelques pays européens. Dans certains pays, les cendres sont utilisées pour l'étanchéité de mines ou utilisées comme filler et charge dans les bitumes ou les bétons, mais ces valorisations sont encore marginales.

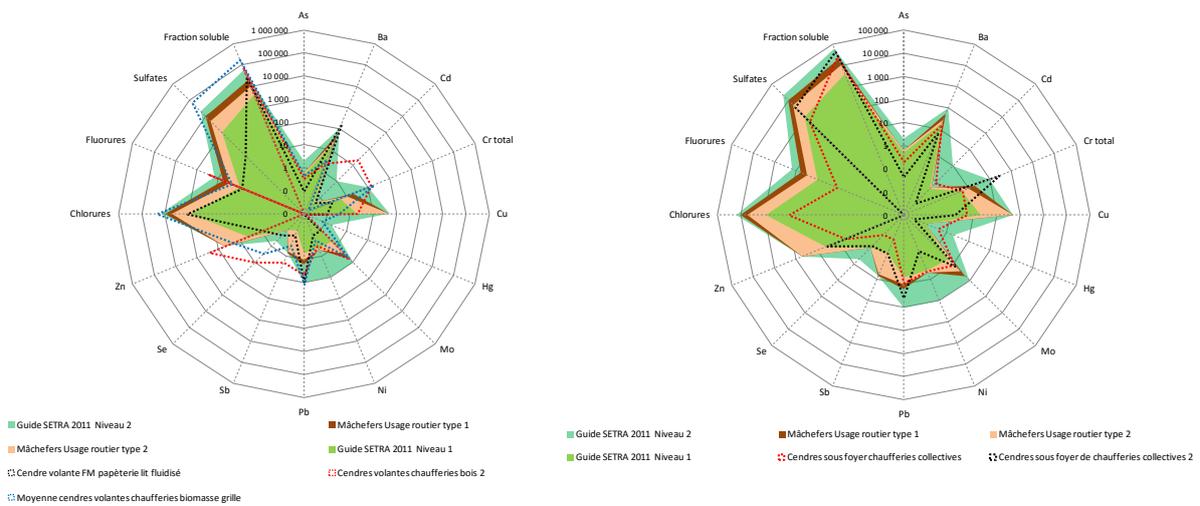
En Suède notamment, des cendres sont utilisées comme matériau pour les sites d'enfouissement.

En France, un papetier (qui produit 70 000 tonnes de cendres) valorise ses cendres volantes en traitement de sol pour techniques routières, ses cendres sous foyer pour la modélisation de décharges en Allemagne et ses cendres grossières (issues du dépoussiérage) en techniques routières (remblais, couche de forme, couche de fondation et couche de base). Les cendres volantes du papetier ont fait l'objet d'études qui ont démontré un intérêt géotechnique et ont reçu une autorisation provisoire pour l'utilisation en stabilisation des sols destinés aux techniques routières.

Des cendres de boues d'épuration (France) sont utilisées en Allemagne pour le réaménagement de mines de sel.

Du point de vue de leur qualité au regard des seuils d'acceptabilité en techniques routière pour les mâchefers ou les cendres volantes de charbon, les cendres de biomasse sous foyer respectent globalement les seuils de niveau 2 du guide SETRA. Les cendres volantes sont globalement au-delà des seuils de la réglementation mâchefer ou des guides SETRA avec un exception pour l'analyse de cendres issue d'un four à lit fluidisé.

**Tableau 29 : Situation de différentes cendres au regard des seuils de lixiviation fixés par la réglementation relative aux techniques routières**



## 2.5 Autres

Certaines cendres volantes sont utilisées pour la stabilisation des déchets industriels (ex : NORKE SNOG).

## Volet 4 : Revue des différents procédés de post-traitement et des démarches R&D en cours ou récents

Notons en préambule que les cendres doivent avoir certaines aptitudes techniques minimales pour l'application considérée ainsi que des caractéristiques les plus constantes possibles. L'application peut être particulièrement intéressante si des cendres ont une propriété spécifique qui leur confère une valeur ajoutée : comportement pouzzolanique qui fournit une meilleure durabilité du béton, alcalins intéressants comme fondants dans le domaine de la céramique mais pénalisants dans la valorisation matière dans les bétons, teneur en éléments neutralisants (Ca, Mg, K) pour l'amélioration des sols acides...

Les propriétés des cendres de biomasse (teneur en chaux, teneur en silice et alumine, granulométrie, densité, quantité de métaux lourds, comportement à la lixiviation...) recherchées sont différentes selon les applications.

Plusieurs applications potentielles dans l'agriculture, l'industrie, le BTP (génie civil, techniques routières), l'industrie ont été identifiées. Elles sont à l'état de R&D ou en phase de démonstration.

### 1 Retour au sol

#### 1.1 Agriculture

Les principales applications en agriculture sont les suivantes :

- Epandage direct ou mélange avec des boues ou des composts de déchets verts
- Matières premières (éléments fertilisants) pour la **production d'engrais** à utiliser en forêt, en grande culture (agriculture), taillis à courte rotation, horticulture...

##### 1.1.1 EXIGENCES TECHNIQUES/CRITERES DE FAISABILITE

###### 1.1.1.1 Aspects techniques

L'épandage de cendres sèches crée un nuage de poussières : il impose donc le port des équipements de protection individuels obligatoires (gants, masques, lunettes, bottes, etc.).

La chaux vive entre 25 et 50 % dans les cendres sèches est corrosive : il est possible de l'éteindre (en partie au moins) en les humidifiant avant manipulation ou traitement.

On note aussi le risque d'auto-échauffement dans certains conditionnements.

Avant épandage direct, il est souvent recommandé d'humidifier les cendres si elles sont sèches pour réduire leur caractère pulvérulent et d'effectuer un broyage ou un criblage (suivi d'un broyage des refus) ainsi qu'un deferraillage : ces étapes permettent d'éliminer les clous, pierres et concrétions qui peuvent endommager les équipements d'épandage et dégrader la qualité des sols.

**Tableau 30 : Granulométrie des cendres et retour au sol** (source programme ECOBIOGAZ)



Il est important aussi de noter que ces étapes de manipulation/traitement des cendres (broyage, criblage, épandages) usent prématurément les matériels, y compris les équipements de convoyage en chaufferie<sup>39</sup>.

La question du stockage est prépondérante, surtout lorsque les flux sont importants. En France notamment, les cendres peuvent être stockées en « bout de champ » (elles sont « solides et peu fermentescibles ») mais cette solution n'est pas toujours possible ou souhaitée par les utilisateurs : les producteurs de cendres doivent donc pouvoir stocker une partie de leur production sur le lieu de production ou dans le périmètre du plan d'épandage. Le stockage permet également de garantir la traçabilité en cas de regroupement de cendres de différentes installations.

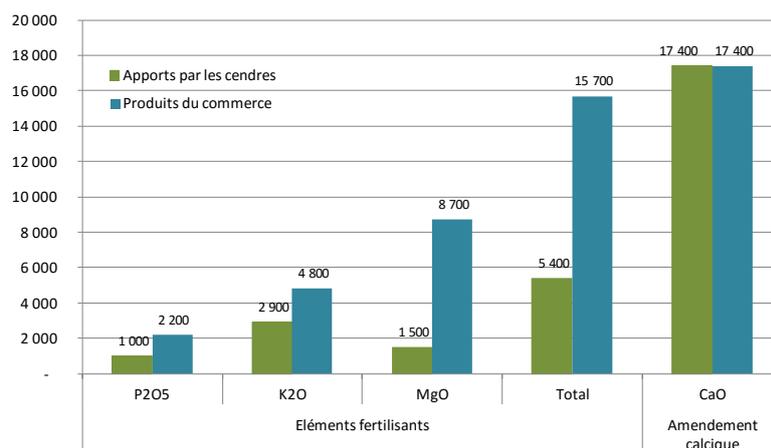
Concernant la dose de cendres à épandre elle peut aller de 0.3-20 t/ha avec en moyenne 4 t/ha selon le type de sol et le peuplement. Pour autant les épandeurs les plus adaptés seraient l'épandeur à hérisson verticaux ou horizontaux plus une table d'épandage et l'épandeur à hérissons verticaux plus un poussoir et une guillotine (source ADEME 2014).

- **Valeur du contenu en engrais des cendres**

On peut évaluer la **valeur du contenu en engrais des cendres** au regard de leur intérêt agronomique en appliquant les coûts à l'unité des engrais du commerce. Il ne s'agit pas d'une valeur « marchande », qui est bien inférieure, mais ce calcul permet de mettre en évidence l'intérêt fertilisant des cendres. Cette valeur s'élève à environ 75 €/t.

On peut estimer la quantité d'engrais du commerce et de chaux substitués par les cendres en France, en prenant l'hypothèse du retour au sol d'au moins 100 000 tonnes de cendres. Dans le graphique suivant, les apports par les cendres correspondent à des tonnes d'éléments fertilisants (en vert) et sont mis en regard des tonnes d'engrais et de chaux nécessaires pour compenser ces apports.

**Tableau 31 : Flux en t/an d'engrais du commerce et de chaux substitués par les cendres en France**

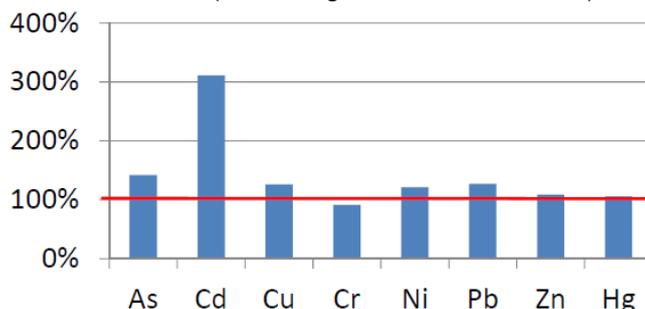


- **Comparaison des cendres avec des engrais sur le plan environnemental**

Les résultats des essais du programme ECOBIOGAZ indiquent le faible impact des cendres en termes d'apport en ETM, comparativement à un apport équivalent d'engrais du commerce.

<sup>39</sup> Christophe VIEUXBLED (agriculteur). Communication personnelle. Janvier 2015. Il évoque l'usure totale de marteaux neufs d'un broyeur après le broyage de 600 tonnes de cendres.

**Tableau 32 : Contenu en ETM de 1,8 t de cendres par rapport au même apport d'engrais minéraux (source AgraOst / ECOBIOGAZ)**



• **Coût de valorisation**

Le coût d'épandage est situé entre 30 €/t et 50 €/t de cendres brute (soit de l'ordre de 1 €/t de bois, soit 0,3 €/MWh): il intègre le coût de l'étude préalable, le suivi analytique des cendres et des sols et le suivi annuel, le stockage, la reprise et l'épandage. Ce coût est inférieur à celui de l'enfouissement et incite donc les exploitants à retenir de mode de valorisation.

Il faut ajouter à ce coût celui du transport, qui s'applique quelque soit le mode de traitement.

1.1.1.1 Aspects réglementaires

Depuis 2013, l'interprétation de la réglementation française aboutit à l'impossibilité d'épandre les cendres grossières extraites du multi-cyclone (cf. volet réglementaire). Les analyses dont on dispose, pour ce qui concerne les éléments traces métalliques, ne montrent pas de différences significatives entre des cendres sous foyers seules et des cendres sous foyer en mélange avec des cendres grossières de dépoussiéreur, même s'il est indiscutable que la contribution des cendres grossières est négative pour ce qui concerne ces éléments. Par ailleurs, l'étude réalisée en 2014 pour le compte de l'ADEME par INDDIGO<sup>40</sup> conclue « La réglementation ICPE dans ces récents arrêtés type relatifs aux installations de combustion biomasse distingue les cendres volantes et les cendres sous foyer et ne catégorise pas spécifiquement les cendres issues du traitement de fumée intermédiaire par multi-cyclone. Le caractère incandescent de ces cendres et leur proximité du foyer font que dans la pratique ces cendres sont mélangées et éteintes avec les cendres provenant du foyer de la chaudière. Les caractéristiques du mélange de ces deux types de cendres sont compatibles avec les seuils fixés pour une utilisation en épandage agricole ».

**1.1.2 PROGRAMMES DE RECHERCHE/R&D, ESSAIS, DEMONSTRATIONS...**

1.1.2.1 France

1.1.2.1.1 Homologation (ex autorisation de mise sur le marché) des cendres : exemple d'un papetier<sup>41</sup>

Le papetier NORSKE SKOG produit des cendres issues de la combustion de biomasse notamment pour les besoins de chaleur de son process. Le combustible est composé d'écorces, de bois de classe A et B, de plaquettes forestières, de boues de désencrage, de boue de STEP industrielle et urbaine, de refus de trituration et refus de papeterie. L'industriel génère à partir d'un four à lit fluidisé 55 000 tonnes de cendres volantes, 7 000 à 8 000 tonnes de cendres grossières et 7 000 tonnes de cendres sous foyer.

En 2009, NORSKE SKOG a lancé des études pour étudier la faisabilité d'épandre des cendres volantes et surtout les homologuer. Sollicité par l'industriel entre 2009 et 2012, le laboratoire RITTMO a montré que les cendres avaient un effet alcalinisant sur les sols et a démontré l'innocuité et l'efficacité des résidus de combustion. Enfin, le laboratoire a réalisé des essais de culture sur des sols ayant été amendés par le produit à homologuer.

La démarche d'autorisation de mise sur le marché (ex homologation ou APV) pour un amendement calcique doit respecter à l'arrêté du 16 juin 80 notamment pour connaître les tolérances sur les paramètres actifs :

- 2,5 pour la teneur en CaO,
- 2,5 pour la valeur neutralisante,

<sup>40</sup> ADEME. Evaluation des performances énergétiques et environnementales de chaufferies biomasse. Août 2014.

<sup>41</sup> VALDENNAIRE B. Positionnement des cendres volantes de NSG par rapport à la réglementation pour plusieurs filières de valorisation. Université de Lorraine. 2013

- pour la teneur en MgO :
  - 1,0 (si MgO < 5 %),
  - 1,5 (si 5 % ≤ MgO < 16 %),
  - 2,5 (si MgO ≥ 16 %)

Plusieurs verrous dissuadent aujourd'hui l'industriel de privilégier cette voie et notamment la question de l'investissement dans un système de stockage mais également la lourdeur des démarches d'autorisation de mise sur le marché.

#### 1.1.2.2 Europe

- Autriche
  - BIOS BIOENERGIESYSTEME

Le rapport KEMA rapporte les travaux animés par l'Université de Graz (2009-2013) pour le développement de pratiques innovantes de valorisation des cendres de bois, dans le but de réduire les quantités éliminées par enfouissement (2009-2013). Les axes de recherche concernent les potentialités d'utilisation des cendres comme fertilisant dans les TCR et comme additif pour le compostage ou en génie civil. Les résultats ont principalement porté sur le retour au sol : il a notamment été montré la possibilité et l'intérêt d'incorporer plus de cendres de bois au compost, en passant de 2 % (seuil actuel) à 8 %.

- BIOTREAT-Wood ash (University of Innsbruck)

Les travaux ont montré l'intérêt neutralisant des cendres de biomasse et de leur incorporation dans les composts.

- Finlande<sup>42</sup>

En Finlande, des programmes de R&D, adossés à l'usine de cogénération de Keljonlahti produisant 50 000 tonnes de biomasse, ont été conduits entre 2009 et 2011 : ces travaux ont notamment porté sur l'utilisation des cendres en agriculture.

- Allemagne<sup>43</sup>

Des travaux ont été conduits en 2011 par l'université technique de Munich sur l'intérêt du retour au sol des cendres en agriculture et sur les conditions de sa mise en œuvre, et sur l'intérêt de la **production de pellets organo-minéraux**.

- Wallonie
  - Greenwin/WaloScrap<sup>44</sup>

Soutenu par le ministère wallon de l'Environnement et avec le support de l'Office Wallon des Déchets (OWD), le projet WALOSCRAP, d'une durée de 12 mois, a pour objectif d'étudier le potentiel de valorisation économique des gisements et des flux locaux de matières secondaires qui sont actuellement mal exploitées ou exportées alors qu'elles pourraient être valorisées en Wallonie.

- Convention CRAW-DGARNE 2012 : 2 essais en forêts et sur prairies

#### 1.1.3 PROGRAMMES COLLABORATIFS

##### 1.1.3.1 Programmes européens

- BIOREFINE<sup>45</sup> (source LDAR)

BIOREFINE est le nom d'un programme transfrontalier IVb 2012-2015. Ce programme prend en compte les co-produits transformés permettant d'être valorisés notamment en Agriculture ou d'autres domaines. Ce programme couvre des territoires anglais, belges, néerlandais, allemand et français.

C'est aussi le nom d'un cluster européen pour le recyclage optimisé des cendres.

Ce groupe très efficace véhicule des idées très intéressantes en termes de :

- valorisation de nouveaux processus de transformation de co-produits (décadmiage, ...) pour co-produits,
- mise en place de plateformes transfrontalières de nutriments,
- certification de produits.

<sup>42</sup> KEMA. Options for increased utilization of ash from biomass combustion and co-firing. Mars 2012.

<sup>43</sup> Rasmus Michael Ett. Organo-Asche-Presslinge als zukunftsorientiertes Düngemittel - Produktionsoptimierung, ernährungskundliches Potential und Machbarkeitsstudie. Janvier 2012

<sup>44</sup> <http://www.greenwin.be/fr/projets/waloscrap>

<sup>45</sup> <http://www.biorefine.eu/biorefine/partners>

La certification régionale ou nationale de processus est envisagée également, quand elle n'est pas déjà effective (Belgique/Allemagne, certification de cendres pour mélange avec des composts).

Lors d'échanges en décembre 2014, a été évoqué l'idée d'un Groupe de travail « cendres » afin de proposer auprès de la Commission Européenne un nouveau produit « cendre » en tant qu'engrais CE ou matières premières de produits fertilisants.

L'animateur de ce groupe de travail serait l'Université de Gembloux, coordinateur de travaux cendres au sein du programme ECOBIOGAZ.

Un rapprochement est en cours avec le groupe de travail sur les cendres du Centre Régional d'Agronomie de Wallonie CRA-W pour valoriser les travaux précédents sur les cendres actuelle ou en projet (boues, digestats, biochar)<sup>46</sup>.

Le programme BIOREFINE conduit notamment les projets de recherche suivants, en lien direct avec la problématique des cendres de biomasse :

- Développement des techniques de récupération des nutriments (NPK) ainsi que des éléments traces métalliques à partir de déchets tels que les cendres.
- Etude de la composition des cendres.
- Essais au champ.
  - ECOBIOGAZ 2012-2015<sup>47</sup>

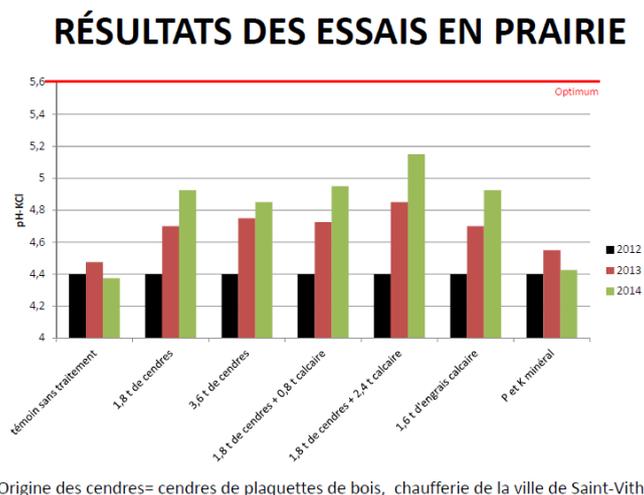
Ce programme transfrontalier belge, allemand, luxembourgeois et français travaille sur les économies circulaires et les activités de valorisation de Biomasses (méthanisation/chaudières biomasses).

L'intérêt du travail est la mise en commun d'information, d'expérience, de projets.

L'action 2.d. concerne la valorisation des cendres de bois, provenant des centrales de cogénération régionale, comme engrais combiné avec une fertilisation azotée issus du digestat de la biométhanisation avec une valorisation agricole (principalement sur prairies) et forestière de cet engrais.

Les résultats concernant les cendres ont été présentés le **21 avril 2015** à Gembloux dans le cadre des Midis de la Biomasse (thème : Pistes de valorisation des cendres issues de chaufferies bois<sup>48</sup>). Les essais ont porté sur l'apport de cendres sur prairies, seules ou en mélange avec des lisiers et des digestats.

**Tableau 33 : Résultats des essais d'apport de cendres sur prairies** (source ECOBIOGAZ avril 2015)



- EUROPEAN SUSTAINABLE PHOSPHORUS PLATFORM ESPP49 (source LDAR)

ESPP est le nom d'un projet porté par un réseau européen éponyme, valorisant le phosphore de co-produits (digestats, déjections, cendres, boues, biochar principalement) en diagnostiquant une

<sup>46</sup> <http://www.valbiom.be/files/library/Docs/Evenements/AG/AG-2013/Atelier-Bioenergies/Projet-Cendres-M.-Abrs-AG2013.pdf>.

<sup>47</sup> <http://www.ecobiogaz.eu/>

<sup>48</sup> <http://www.valbiom.be/evenements/les-midis-de-la-biomasse.htm>

<sup>49</sup> <http://www.phosphorusplatform.eu/>

diminution des volumes des engrais de synthèse ou d'origine minière (Maroc principalement) et une augmentation des prix.

Ce réseau intervient sur le même territoire que BIOREFINE et souhaite valoriser les coproduits du Benelux, transformés ou non, produits ou matières premières en intervenant sur l'harmonisation 2003/2003.

Depuis l'été 2014, le Phosphore a été considéré comme stratégique par la Commission européenne<sup>50</sup>. Un programme cadre est envisagé pour privilégier le phosphore de recyclage (boue, cendres, digestats, compost) dans la fabrication au sein de l'Europe

Une plateforme française est en cours de montage autour des activités IRSTEA Rennes /INRA Bordeaux/CIRAD Montpellier/LDAR LAON.

### 1.1.3.2 Programmes français

Des programmes collaboratifs existent en France sur la thématique « cendres ». On citera les programmes financés par ADEME (REACTIF/RESPIRE).

L'ONF est impliqué dans ces programmes notamment pour l'utilisation des cendres en circuits courts pour un retour de cendres en forêts.

## 1.2 Forêt

L'épandage de cendres peut augmenter la production de bois lorsque les forêts sont installées sur des sols minéraux carencés en Ca, Mg, K et sur des sols organiques (Augusto, et al., 2008). Des expérimentations réalisées en Finlande démontrent que en moyenne un épandage de 4t/ha de cendres permet de gagner +2-4 m<sup>3</sup>/ha/an, avec une durée des effets de 30-40 ans (Swedish Forest Agency, 2006).

L'épandage en forêt est possible en France pour certaines cendres de biomasse depuis 2013.

### 1.2.1 EXIGENCES TECHNIQUES/CRITERES DE FAISABILITE<sup>51</sup>.

#### 1.2.1.1 Traitement

Pour être épandues en forêt et avoir des effets de fertilisation et d'amendement à long terme, sans causer de dommages à la végétation et à la faune du sol, les cendres doivent être traitées avant l'épandage (source projet ReCash, Sylvogène et projet ICIF en France). Le traitement a pour objectif de stabiliser les cendres et de les rendre aussi homogènes que possible en minimisant la proportion de particules fines. Les effets des chocs alcalins sur la végétation au sol peuvent ainsi être évités. Une fois traitées, les cendres sont de qualité homogène et sont également plus faciles à épandre en forêts La stabilisation est également chimique. Le « durcissement » chimique est basé sur la présence d'oxydes convertis en hydroxydes par addition d'eau et éventuellement en carbonates par réaction avec du dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère. Ces réactions chimiques rendent les cendres moins réactives et les éléments chimiques présents moins solubles ( $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$  ;  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ).

Il existe actuellement deux méthodes principales pour le traitement des cendres :

- l'auto-durcissement et broyage;
- la granulation. La granulation est souvent plus coûteuse que la technique d'auto-durcissement et de broyage.

Ces méthodes sont toutes basées sur l'humidification des cendres sèches avec de l'eau. L'humidification est une étape qui peut se révéler délicate selon le degré de volatilité et d'électrostaticité des cendres. Plus elles sont fines plus il est difficile d'humidifier uniformément.

L'humidification peut être réalisée à la bétonnière, malaxeur alimenté par un convoyeur à vis (Ce système est généralement installé dans des chaufferies ayant une grosse production de cendre en continue).

- **Auto-durcissement et broyage;**

Une quantité d'eau suffisante pour humidifier toutes les surfaces des particules de cendres (environ 40% pour des cendres volantes et 15% pour les cendres sous foyer, calculée en % de la masse) est ajoutée. La cendre humidifiée est ensuite répartie sur une surface plane (zone de stockage temporaire), où elle va s'auto-durcir, pendant quelques jours à quelques mois.

---

<sup>50</sup> [http://www.cdep.ro/afaceri\\_europene/CE/2014/COM\\_2014\\_398\\_FR\\_ACTE\\_f.pdf](http://www.cdep.ro/afaceri_europene/CE/2014/COM_2014_398_FR_ACTE_f.pdf).

<sup>51</sup> ADEME/UCFF. Etude sur la valorisation des cendres de biomasse en forêt. 2011-2013.

Une fois que la cendre a durci, le tas formé doit être brisé, avec une pelleteuse par exemple. Les cendres sont ensuite broyées afin d'obtenir des particules de taille plus fines pour un épandage homogène. Le broyage peut être effectué avec un broyeur ou un godet de criblage, monté sur un tracteur avec des cylindres de broyage à sa base. Le produit obtenu est sous forme de granules de cendres d'environ de 2 à 10 mm. Selon l'étude ADEME citée précédemment, le coût approximatif est de :

- 5-11 €/tonne pour mélanger avec de l'eau ;
- 4-7 €/tonne pour concassage et de criblage ;
- ou 2-5€/tonne pour le broyage/criblage avec un godet.
- Soit un prix de revient du produit fini de 11-20€/tonne.

- **Granulation**

- **Méthode rustique « scandinave »**

La granulation selon la méthode scandinave consiste à « rouler » le mélange de cendres et d'eau dans un tambour type bétonnière. Une fois les granulés formés, ils sont séchés à l'air chaud pour éviter qu'ils ne s'agglomèrent ensemble. La manipulation des cendres granulées est plus propre que la manipulation des cendres auto durcies. La principale objection à cette technique est son coût, due aux besoins de chaleur lors de la formation des granulés. Cependant cette technique de granulation existe également avec une formation des granulés sans chaleur, auto-séchés, ce qui réduit les coûts (le prix varie entre 8-12 €/tonne de granulés finis (auto-séchés), voire 4-5 €/t en routine). Différents types de liants peuvent également être ajoutés dans le procédé de granulation pour rendre le produit final encore plus stable. Les granulés peuvent également être revêtus d'une couche superficielle dense, par exemple, de lignine ou de stéarate, afin de réduire davantage le taux de lixiviation.

- **Pelletisation**

Le procédé de compactage consiste à produire de gros granulés formés à partir du mélange de cendres et d'eau grâce à une machine de pressage. Le coût approximatif (opérations + transport) est de 9.5 €/tonne pour des cendres sèches et 6.6 €/t pour des cendres humides. Il faudrait ajouter un investissement de capital de 3-8.7 €/t de cendres (Emilsson, 2006).

#### 1.2.1.2 Epandage

L'épandage en forêt est plus complexe que sur des terrains agricoles. Les contraintes physiques (pente, souche, faible portance des sols, etc.) imposent au matériel d'être très maniable et léger. Par rapport au matériel agricole, le matériel forestier est équipé de pneus renforcés basse pression, de chaînes, d'un châssis avec une garde au sol plus importante. L'épandeur est un caisson d'épandage monté sur un débardeur forestier, solidaire du tracteur ou articulé. Pour des cendres humides et lorsque les conditions le permettent du matériel agricole (tonne à lisier, épandeur à fumier) peut être utilisé pour un épandage en forêt. C'est notamment le cas dans des forêts de plantation où la circulation dans les inter-rangs est plus facile. Dans ce cas les tracteurs doivent être adaptés.

La forme des cendres est également très importante pour atténuer l'effet alcalin agressif sur le sol et la végétation, réduire la solubilité des éléments et faciliter la logistique d'épandage. Il est déconseillé d'utiliser une cendre brute sèche. Selon les pays, les formes de conditionnement privilégiées sont (source étude RESOBIO) :

- granulation en Finlande (mais des travaux sont en cours dans de nombreux pays, on peut citer l'Autriche, la Lituanie et la France),
- auto-durcissement, broyage et criblage, en Suède,
- humidification et mélange avec de la dolomie en Allemagne.

#### 1.2.2 PROGRAMMES DE RECHERCHE/R&D, ESSAIS, DEMONSTRATION...

Les principaux résultats de recherche sur les utilisations possibles des cendres de bois sont issus principalement de travaux réalisés dans les pays scandinaves (Suède, Finlande et Danemark) et aux Etats-Unis. Toutefois, depuis 2011, la France a étudié, au travers notamment de chantiers de démonstration, l'opportunité du retour des cendres de biomasse en Forêt.

D'une manière générale, l'ensemble des travaux et programmes de recherche menés en Europe aboutissent à des conclusions assez comparables et favorables au retour au sol en forêt sous réserve de certaines conditions :

- Epandage des cendres sous foyer privilégié.
- Amélioration de la minéralisation sur sols acides.
- Raisonnement sur sols carencés.

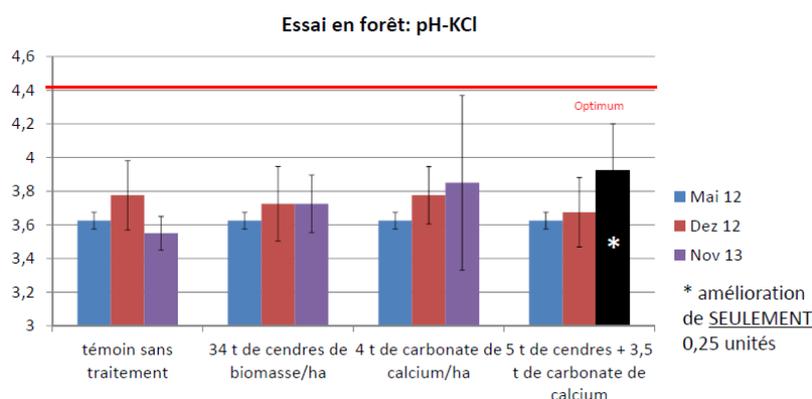
- Faibles concentration des métaux dans les sols.
- Application sur sols acides.
- Amélioration des rendements des peuplements.
- Traitements préalables pour éviter les effets négatifs de la basicité.

#### 1.2.2.1 Europe

##### • Belgique/France ECOBIOGAZ

Les résultats confirment ceux constatés en France dans le cadre du programme UCFF/ADEME : les apports de cendres doivent être massifs pour remonter le pH. Mais il est rappelé la nécessité du retour des nutriments, à travers l'apport de cendres de biomasse, exportés lors de l'exploitation du bois.

**Tableau 34 : Résultats des essais des apports de cendres en forêt** (source ECOBIOGAZ avril 2015)



##### • Suède

La Suède est le pays le plus en pointe en Europe sur le retour des cendres de biomasse en forêt. On peut citer les programmes suivants.

- «Ash Programme» 2002, 2006-2008, 2009-2011 (budget cumulé de 10 millions d'euros). Ce programme est piloté par un institut technique de recherche, le Värmeforsk, et il a associé une trentaine de grosses compagnies. Le dernier programme a donné lieu à un colloque en janvier 2012 : « Ash Utilisation 2012, Ashes in a Sustainable Society ».
- «RecAsh» (projet Life 2003-2006 ; budget de 1,7 millions d'euros) qui a produit des recommandations techniques spécifiques pour l'utilisation des cendres en forêt et favorisé des échanges entre acteurs (voir publications du projet RecAsh, 2006).
- Programme "Efficient forest fuel supply systems" reconduit en 2011 pour 4 ans qui intègre explicitement le retour des cendres en forêt dans le cadre d'une mobilisation accrue de la biomasse.

##### • Suisse

En Suisse, on peut citer deux :

- le projet HARWA (Holzasche-Recycling im Wald), coordonné par le WSL (Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage) entre 1997 et 2001, a étudié l'intérêt du recyclage de cendres de bois en forêt sur sols acides en compensation d'exportations accrues. Ces travaux concluent à l'intérêt du recyclage de cendres pour remédier à l'acidification des sols.
- une synthèse bibliographique sur les « cendres de bois et forêt » dans le cadre du « plan d'action Bois » de l'Administration fédérale adossé à un atelier en 2010 visant à jeter les bases d'une stratégie pour développer cette voie de valorisation en Suisse.

##### • Espagne

Plusieurs études ont été menées par l'Université de Santiago de Compostella. Ces travaux s'appuient sur des dispositifs installés au début des années 2000.

##### • Irlande

Une étude en cours conduite par l'université de Cork poursuit l'objectif d'étudier l'incidence de la valorisation de cendres de biomasse propres en forêt.

### 1.2.2.2 France

Plusieurs études et programmes récents ont permis de faire un grand pas sur la question du retour des sols en forêt :

- ADEME/UCFF. Etude sur la valorisation des cendres de biomasse en forêt 2011-2013. (voir détail des résultats en annexe)

L'étude précise « En raison du caractère innovant de l'épandage de cendres en forêt, des recherches complémentaires sont également à mener pour améliorer l'analyse économique d'un épandage de cendres en forêt et arriver à des résultats 100% français. L'opération peut s'avérer rentable lorsqu'elle est faite par un porteur forestier, que les cendres n'ont pas fait l'objet d'un traitement (auto-durcissement ou granulation) et les surfaces des chantiers impliquées sont supérieures ou égales à 20 ha.

L'épandage de cendres pourrait être rentable s'il existait de **mesures de compensation** ou **si les conditions de la station permettaient une augmentation de la croissance des peuplements** dû à l'effet des cendres. Augmentation qui se traduirait en revenus supplémentaires pour le propriétaire et qui pourrait l'inciter à investir au départ pour compléter le financement de l'opération. De même, la bonne planification logistique (transport de cendres) ainsi que l'optimisation des journées de travail et la bonne calibration de la dimension des chantiers jouent un rôle fondamental dans le coût. »

L'étude montre que la rentabilité intervient à partir d'une surface de 20 ha et que la granulation (avec de la matière minérale ou organique) est une voie intéressante pour éviter les phénomènes de prise en masse ou les effets liés au caractère pulvérulent et corrosif des cendres.

Selon l'étude ADEME, les risques biologiques, agronomiques et écotoxicologiques associés à l'épandage de cendres méritent d'être mieux quantifiés à ce stade.

Ainsi, dans le prolongement de ces travaux, un **appel à projet REACTIF/RESPIRE**, qui débute en 2015 pour une durée de 3 ans, vise à évaluer l'incidence environnementale des épandages (le programme RECASH a déjà conduit des études sur cette problématique) et notamment le devenir des métaux lourds dans les sols, l'objectif étant à terme de faire évoluer favorablement la réglementation.

- ADEME. Projet RESOBIO. Gestion des rémanents forestiers : préservation des sols et de la biodiversité. 2014.
- ONF/INRA/FCBA : itinéraires de Culture Intensifs en Forêt. Le projet ICIF, coordonné par l'ONF, vise à tester la faisabilité d'itinéraires de culture intensifs en forêt pour répondre à une très forte demande de biomasse forestière. Le projet a débuté en 2011. Le projet ICIF-Itinéraire de cultures intensives en forêt, avec ONF-R&D évalue notamment l'opportunité de l'épandage de cendres sur des sols très acides et chimiquement pauvres, dans la forêt publique des Ardennes. Les cendres proviennent d'une installation approvisionnée par ONF-Énergie et financée par l'ADEME dans le cadre du Fonds Chaleur. Elles ont été épandues sous forme de granulés, sur un dispositif implanté d'environ 15 ha, avec différentes essences (résineux et feuillus). Les impacts sur la croissance des peuplements, les sols et la biodiversité seront suivis dans le temps.
- **Appel à projet REACTIF/RESPIRE 2015-2018.**

Ces travaux aboutissent à des conclusions favorables et encourageantes pour le retour des cendres en forêt.

#### • Focus sur le potentiel en forêt

La surface forestière s'élève à 16,5 millions d'ha dont 10 millions d'ha en forêt privée. En forêt publique (forêts domaniales principalement), le morcellement est inexistant et les parcelles de grande taille (> 20-25 ha) majoritaires. En forêt privée, les parcelles de plus de 25 ha représentent une surface de 5 millions d'ha environ. Au total, une surface de près de 10 millions d'ha (forêt publique et forêt privée de plus de 25 ha) pourrait concerner les épandages de cendres, soit un potentiel très supérieur à la production de cendres en France.

### 1.3 Taillis à courte ou très courte rotation

Le programme BIOENERGIESYSTEME (Autriche) mis en place entre 2009 et 2013 a examiné l'intérêt de l'apport de cendres de biomasse pour des taillis à très courte rotation (TTCR), en tant qu'amendement basique. Les études ont également porté sur la capacité des TTCR à capter les éléments-traces métalliques.

## 2 Valorisation matière

### 2.1 Types d'utilisation

#### 2.1.1 BATIMENT/MATERIAUX

Les principales voies de valorisation matière sont énumérées ci-après :

- Production de clinker (ciment), comme matière première (Autriche et Pays-Bas uniquement),
- Production de briques en remplacement du sable (pratique courante en Autriche et Pays-Bas uniquement),
- Production de liants alternatifs (par exemple, les géopolymères),
- Production de granulats synthétiques par collage à froid
- Remplacement de sable dans les bétons non armés préfabriqués,
- Incorporation dans des panneaux agglomérés. Des limites réglementaires et ou techniques limitent à 20 % l'usage possible de ce matériau.
- Incorporation à des céramiques (France notamment).

L'utilisation de cendres volantes de centrales thermiques dans le secteur du bâtiment (clinker, bétons), est éprouvée et normalisée.

#### 2.1.2 GENIE CIVIL

Les principales applications sont les suivantes :

- Matériaux de construction qui augmentent la portance des routes forestières (phase de démonstration en Autriche, Finlande et Suède)
- Liant pour la stabilisation des sols dans la construction de la route, en remplacement de la chaux comme liant (phase de démonstration en Autriche, Finlande et Suède)
- Aménagements paysagers (murs, remblais, collines, remblaiement)
- Stabilisation des déblais de dragage
- Modélisation/aménagement de décharges

### 2.2 Exigences techniques/critères de faisabilité

#### 2.2.1 BATIMENT/MATERIAUX

##### 2.2.1.1 Incorporation dans le clinker et les bétons

Ces deux modes de valorisation concernent aujourd'hui quasi exclusivement les cendres de charbon.

Les cendres volantes de charbon sont utilisées fréquemment dans la production de ciment en raison de leur comportement pouzzolanique principalement. Les éléments Si, Al, Fe et S sont ciblés par les normes européennes E-450 et ASTM 618.

##### 2.2.1.1.1 Incorporation au clinker

Le clinker est constitué essentiellement de **silicates calciques** (C2S, C3S...). Le clinker est un constituant du ciment artificiel, qui résulte de la cuisson d'un mélange composé d'environ 80 % de calcaire (qui apporte le calcium) et de 20 % de matériaux aluminosilicates (notamment les argiles qui apportent le silicium, l'aluminium et le fer).

Les réactions mises en œuvre sont les suivantes :

- Réaction hydraulique (= prise du ciment)
  - C3S (silicate tri calcique),  $C_2S + H_2O \rightarrow CSH + Ca(OH)_2$
- Réaction pouzzolanique (de la cendre volante)
  - Silice + CaO + H<sub>2</sub>O = Silice +  $Ca(OH)_2 \rightarrow CSH$  (silicates de calcium hydraté)

Les différentes qualités de ciments définies par la norme EN 197 - 1 sont obtenues par broyage fin du clinker (ciment sorti du four avant broyage) avec 35 % au maximum de constituants secondaires : cendres silico-alumineuses, fillers calcaires, laitiers de hauts-fourneaux. Les cendres volantes de charbon ont la propriété de consommer de l'hydroxyde de calcium ou portlandite (formé lors de réaction du ciment avec l'eau) tout en générant des silicates de calcium hydratés (CSH) **insolubles dans l'eau**, et responsables du durcissement du béton, renforçant ainsi la résistance du béton. Les cendres silico-alumineuses sont également ajoutées au clinker en tant que correcteur d'aluminium, silice et fer, en substitution des argiles, et pour réduire les quantités de clinker nécessaires.

Le ciment obtenu à partir du clinker est un liant hydraulique, donc un matériau qui fait prise et durcit en vertu d'une réaction chimique à l'eau appelée **hydratation**.

L'incorporation des cendres de biomasse est possible après broyage puis mélange au clinker. Cette voie de valorisation est en développement, notamment en Europe.

#### 2.2.1.1.2 Incorporation dans les bétons

Les cendres volantes de charbon sont des matières à part entière dans la fabrication des bétons (cf. Norme E-450) compte tenu de leurs propriétés pouzzolaniques.

Le nom de pouzzolane est donné à toute substance (naturelle ou artificielle) capable de conférer à une chaux ou un ciment, **son hydraulité**. Autrement dit, la « propriété pouzzolanique » est l'aptitude d'un matériau à se combiner à **température ambiante** et en présence d'eau avec la chaux ou la portlandite pour donner des hydrates très peu solubles.

Les alcalins présents dans les cendres entraînent des retards de prise, les alcalins non piégés dans le ciment pouvant réagir avec les agrégats.

En France, la réglementation sur les bétons s'est récemment durcie avec la mise en place de tests de résistance aux alcalins, en vue de limiter la production d'agrégats. Compte tenu de leur composition, les cendres de biomasse sont exclues quasiment « de facto ». Toutefois, plusieurs travaux de recherche (Espagne, Italie) ont permis de démontrer la possibilité de cette voie de valorisation.

L'incorporation des cendres de biomasse peut être réalisée dans les centrales à bétons, lors du mélange des différents constituants. Notons, que contrairement à la valorisation dans les ciments, il s'agit ici d'un simple mélange, d'une minute environ, et non d'un process complexe (broyage, mélange long...) comme la production du ciment. L'additif doit donc être prêt à l'emploi et correspondre parfaitement aux exigences du process.

Les cendres peuvent être utilisées comme substitut au ciment dans les mortiers. Cette filière est confrontée à une difficulté principale : le gonflement du béton en raison de la teneur en chaux libre dans les cendres.

#### 2.2.1.2 Incorporation dans les céramiques

Les céramiques constituent une famille de matériaux de base et sont, pour la plupart, constitués de composés naturels tels qu'oxydes, silicates.

Les cendres de biomasse contiennent des fondants alcalins (Na, K, Phosphates) favorisant la fusion avec la silice à 1 100 °C. Les cendres peuvent se substituer notamment aux feldspaths, utilisés en céramique.

### 2.2.2 GENIE CIVIL

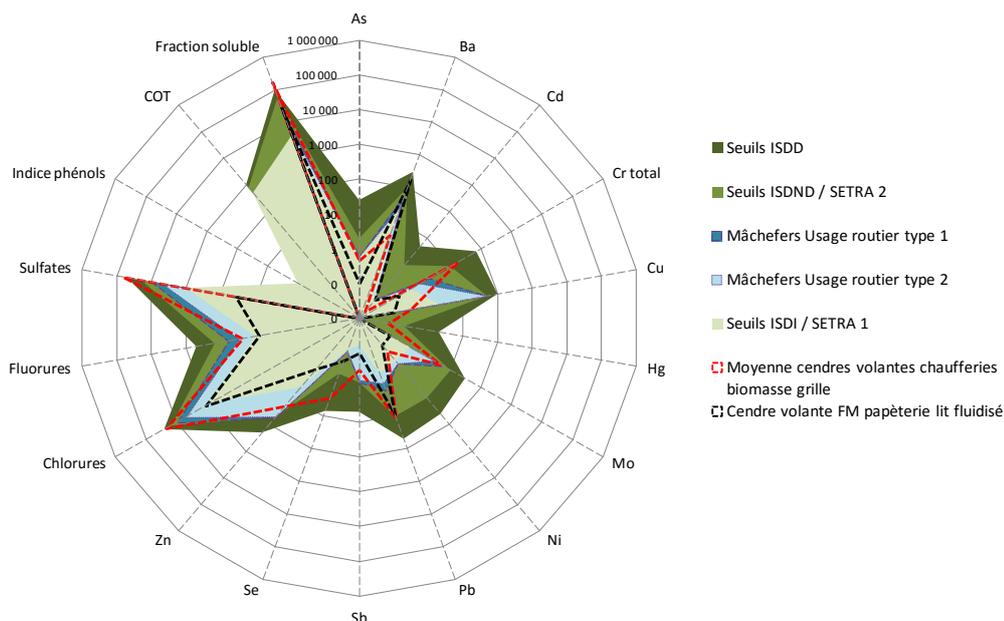
#### 2.2.2.1 Techniques routières

Par assimilation avec l'utilisation des mâchefers d'ordures ménagères (MIOM), les cendres de biomasse pourraient entrer dans la constitution de remblais et sous couches de chaussées en tant que :

- liant à faible caractère pouzzolanique,
- correcteur granulométrique ou filler dont le rôle est de compléter la granulométrie d'un matériau pauvre en fraction fine (inférieure à 500 µm).

Des applications en traitement de sol (techniques routières) sont aussi possibles et sont moins contraignantes du point de vue de la réglementation. Au moins un industriel a recours à cette solution en France.

**Tableau 35 : Seuils lixiviation mg/kgMS en base log et valeurs cendres volantes - CEDEN**



Or en 2001, l'étude réalisée par l'ADEME sur la gestion des cendres de biomasse rappelait que les analyses ont démontré qu'il existe toujours un paramètre discriminant (fraction soluble, teneur en imbrûlés ou teneurs en métaux lourds) qui ne permet pas de valoriser ces cendres au même titre que les MIOM maturés.

Toujours selon cette étude, certaines des cendres analysées pouvaient rentrer dans la catégorie valorisable au sens de la circulaire mâchefer après un pré-traitement (analogie avec la période de maturation des mâchefers). Une diminution de la fraction soluble (par lavage) permettrait de valoriser les cendres de plaquettes en techniques routières, mais le problème à prendre en compte serait alors le traitement et l'élimination des eaux de lavage.

Les mâchefers avant d'être valorisés en techniques routière doivent respecter des valeurs limites en termes de lixiviation de la fraction soluble.

La gestion mâchefers est encadrée par les textes suivants :

- La circulaire du 17 janvier 2005 relative à la gestion des résidus d'épuration des fumées d'incinération d'ordures ménagères, définit les filières d'élimination envisageables pour ce type de déchet.
- L'arrêté du 30 décembre 2002, relatif au stockage de déchets dangereux, a imposé la stabilisation des résidus de l'incinération (suires, cendres non volantes, poussières fines, cendres volantes, déchets de neutralisation des gaz) et mâchefers issus de l'incinération des déchets industriels.

Aujourd'hui, on fait un constat identique quand on confronte les résultats des tests de comportement à la lixiviation de cendres de biomasse et les valeurs limites imposées par la réglementation sur l'utilisation des mâchefers en techniques routières ou au regard des valeurs du Guide SETRA. Deux solutions sont envisageables :

- Une stabilisation à l'image des MIOM.
- Un mélange avec d'autres matériaux (liants hydrauliques routiers). Cette solution peut s'apparenter toutefois à une forme de « dilution », son acceptabilité réglementaire doit donc être validée au préalable.

La valorisation en technique routière est souvent confrontée à l'inadéquation entre des tonnages faibles et diffus et les besoins sans commune mesure des chantiers.

## 2.3 Programmes de recherche/R&D, essais, démonstration...

### 2.3.1 FRANCE

- CERACENDRE (voir détail des résultats en annexe)

Le projet CERACENDRE, soutenu par l'ADEME et porté par la Société française de céramique (SFC) a débuté en 2011 et s'est terminé en décembre 2014. Il visait à étudier l'opportunité d'incorporer des cendres de biomasse dans des céramiques.

Selon le responsable du programme<sup>52</sup>, les conclusions sont probantes et l'utilisation est possible sous réserve d'un certain nombre de traitements préalables (broyage, déferrailage, criblage).

L'incorporation de cendres de biomasse est intéressante à plusieurs titres pour la filière céramique :

- Substitution d'une matière première onéreuse (de 20 €/t pour les terres cuites à 70-80 €/t pour les autres céramiques et notamment le secteur sanitaire)
- Coûts de transport réduits : les gisements de cendres des chaufferies bois sont très diffus sur le territoire, à l'image de filière céramique

La valorisation en céramique présente plusieurs atouts :

- L'industrie est diffuse sur le territoire français. Si les besoins sont importants à l'échelle nationale, ils sont diffus et donc peu importants par site. Il y a donc une adéquation avec le caractère diffus des chaufferies et donc des gisements de cendres.
- D'un point de vue environnemental, la valorisation en céramique permet de piéger les éléments indésirables (métaux) au travers d'un processus de vitrification (stabilisation au sens de la réglementation sur les déchets) et de les diluer au travers la production d'éléments de petite taille (exemple : sanitaire) et répartis partout dans le monde. Il n'y pas un phénomène de concentration comme dans le cas des techniques routières ou dans la production de béton.

- VALOCENDRE

Le projet VALOCENDRE<sup>53</sup>, d'une durée de 30 mois va débuter au premier semestre 2015. Il est porté par un consortium piloté par Norske Skog Golbey (papèterie à base de papier recyclé) dans le cadre d'un appel à projet BIP. Un utilisateur de bétons pour des applications spécifiques fait partie du consortium.

Contrairement au programme CERACENDRE qui portait principalement sur des cendres sous foyer, seules les cendres volantes de l'industriel seront concernées (55 000 tonnes).

Plusieurs verrous doivent être levés dans le cadre de ce programme et principalement celui consistant à éteindre la chaux vive. Il ne semble pas, au vu des premiers tests qui ont eu lieu par le passé sur les cendres du papetier, que les chlorures soient un frein à l'incorporation dans les bétons.

- Techniques routières

Certaines cendres sont déjà utilisées en techniques routières (ex : cendres grossières issues d'installations équipées d'un four à lit fluidisé.) Certaines cendres volantes, non valorisables directement en techniques routières (inadéquation avec les seuils imposés par les réglementations) bénéficient d'une autorisation provisoire pour le traitement des sols pour techniques routières. L'industriel souhaitait obtenir une autorisation définitive pour des applications plus larges en techniques routières, afin de valoriser davantage de cendres volantes selon cette voie.

En technique routière, les cendres peuvent être utilisées de différentes manières<sup>54</sup> :

- dans un mélange Sols + cendres
- dans un mélange Sols + cendres + liant hydraulique routier (LHR)
- cendres humidifiées seules
- cendres humidifiées + LHR
- dans un mélange Grave naturelle ou recyclée + cendres
- dans un mélange Grave naturelle ou recyclée + cendres + LHR
- comme constituant de Matériaux auto-compactant
- comme constituant de Liant hydraulique routier (LHR)

L'industriel NORSKE SKOG a entrepris en 2012-2013 des essais à grande échelle (6 000 tonnes de cendres volantes (de filtres à manche issues d'un four à lit fluidisé) en partenariat avec un industriel du BTP. L'objectif était de valider le procédé de mise en œuvre, vérifier les performances mécaniques du produit et pouvoir faire des mesures environnementales.

Les résultats des tests de lixiviation ont été particulièrement probants, pour l'ensemble des étapes simulées de la vie de l'ouvrage (avant, en fonctionnement, après démolition). Toutefois, les tests ont été réalisés sur des cendres en mélange avec un liant hydraulique routier (le mélange obtenu est le matériau finalement utilisé en techniques routières) : or il semble que les tests doivent porter sur les cendres seules, ce qui rend le respect des seuils plus difficile à atteindre.

---

<sup>52</sup> Communication personnelle M. Filhol de SFC en mars 2015.

<sup>53</sup> Communication personnelle Mme BORTOLOTTI Norske Skog en mars 2015.

<sup>54</sup> VALDENNAIRE B. Positionnement des cendres volantes de NSG par rapport à la réglementation pour plusieurs filières de valorisation. Université de Lorraine. 2013

- **Programme EVACEB**

Eco-valorisation des cendres de biomasse.

Mandataire : exploitant de chauffage.

Partenaires : 2 laboratoires notamment.

Sur 3 ans à partir de fin 2015 début 2016.

Dans le cadre du CIFRE.

Production d'éco-liants notamment utilisés en techniques routière.

Le plan de financement n'est pas encore finalisé.

## **2.3.2 EUROPE**

### 2.3.2.1 Incorporation dans les ciments

- **BIOCOMBUST** (voir détail des résultats en annexe)

BIOCOMBUST est un projet de recherche interdisciplinaire impliquant des partenaires français, suisses et allemands en partenariat avec HOLCIM. Son but est d'étudier les émissions de particules et les cendres produites lors de la combustion de bois, de copeaux de bois et de granulés, l'impact de cette pollution atmosphérique sur la santé humaine et les opportunités de valorisation des cendres.

Le potentiel de valorisation des cendres de biomasse comme additif de ciment a été étudié. Dans le cadre du projet, différents types de cendres ont été testés à partir des divers dispositifs de récupération des cendres de combustion, comme les cyclones, des électrofiltres et les filtres à manches et sous les grilles. En outre, différents types de combustibles de biomasse ont été comparés.

Les résultats de l'étude ont font l'objet d'une présentation le **23 avril 2015 à Strasbourg**.

**L'utilisation des cendres de biomasse n'est possible que pour certaines applications spécifiques** (marchés de niche) **et entraîne une vraie plus-value au produit final** (effets « spéciaux » recherchés pour certains ciments). Pour **certaines applications, la présence de chaux vive est même une condition nécessaire. Le broyage des cendres avant incorporation au ciment est indispensable. L'incorporation doit être de 15 % maximum pour ces applications.**

### 2.3.2.2 Incorporation dans les bétons

- Université de Grenade

En 2013, des chercheurs de l'Université de Grenade sont arrivés à fabriquer un béton autocompactant à partir de cendres provenant de la combustion en chaudière de pellets fabriqués avec des restes d'émondage d'olivier.

Les scientifiques ont présenté, dans un article publié dans la revue "Construction and Building Materials", les résultats préliminaires de l'utilisation des cendres volantes provenant de la combustion, dans des chaudières domestiques, de pellets fabriqués avec des résidus provenant de la biomasse d'olivier, comme substitut du filler dans la fabrication de béton autocompactant. Ce béton présente une résistance à la compression légèrement supérieure à celle du béton traditionnel, et supérieure au minimum établi par le Décret Royal 1247/2008, du 18 juillet, par lequel est approuvée "l'instruction de béton structurel".

Toutefois, si l'utilisation de cendres volantes de biomasse comme filler en béton autocompactant est faisable, elle nécessite une étude à plus grande échelle et avec une plus grande portée afin de garantir la fabrication d'un béton de haute qualité.

- Italie

Dans les années 2000, une équipe italienne a réalisé des essais d'incorporation de différentes cendres de biomasse dans les bétons<sup>55</sup> (<http://www.enco-journal.com/journal/ej34/sforza.html>).

Les résultats ont été peu probants et ont notamment mis en évidence l'effet de gonflement du mortier en raison de la présence de cendres.

- Finlande<sup>56</sup>

En Finlande, des programmes de R&D, adossés à l'usine de cogénération de Keljonlahti brûlant 50 000 tonnes de biomasse, ont été conduits entre 2009 et 2011 : ces travaux ont notamment porté sur l'utilisation des cendres pour la production de béton.

---

<sup>55</sup> Giuseppe Sforza - General Admixtures SpA, Ponzano Veneto (TV). Giacomo Moriconi - Università Politecnica delle Marche, Ancona L'UTILIZZO DI CENERI DA BIOMASSA PER UNO SVILUPPO SOSTENIBILE DEL CALCESTRUZZO.

<sup>56</sup> KEMA. Options for increased utilization of ash from biomass combustion and co-firing. Mars 2012.

Un programme mis en place entre 2011 et 2012 a été conduit pour déterminer les conditions de production à grande échelle de granulés de cendres, dans un but notamment de valorisation en forêt.

### 2.3.2.3 Techniques routières/travaux d'aménagement

#### 2.3.2.3.1 Autriche

Dans le cadre du programme BIOS BIOENERGIESYSTEME (2009-2013), les travaux ont montré l'intérêt des cendres de biomasse pour la construction de routes forestières.

Les études menées par Supancic K. et Obernberger I. ont montré l'intérêt de substituer de la chaux vive par des cendres en tant de liant pour stabiliser les argiles et les limons. Les préconisations favorisent l'utilisation de cendres sous foyer en mélange ou non avec des cendres grossières ou de cendres volantes issues de lits fluidisés, moins chargées en métaux lourds que les cendres volantes issues de fours à grille. L'utilisation de cendres de biomasse réduit les coûts mais rallonge les temps de traitement en raison des flux manipulés plus importants. Par ailleurs des équipements spécifiques peuvent être nécessaires compte tenu de la taille des particules supérieure à celles de la chaux.

Par ailleurs, les études ont montré l'intérêt de l'utilisation de cendres de bois en substitution de la chaux comme liant hydraulique pour la stabilisation des sols dans la construction de routes (remarque: le papetier Norske Skog dispose d'une autorisation provisoire dans ce domaine spécifique). Toutefois, les incidences environnementales sont toujours en cours d'évaluation.

#### 2.3.2.3.2 Suède

Dans le cadre du programme Värmeforsk la Suède a conduit ces 10 dernières années des études dans les domaines de la valorisation des cendres en techniques routières, en stabilisation de matériaux de dragage, en stabilisation de boues (cendres volantes) et en couverture de décharges.

### 2.3.2.4 Remplacement de polymères

#### 2.3.2.4.1 Wallonie

Projet convention CEBEDEAU-DGARNE : remplacement de polymères utilisés dans le traitement des boues par des cendres (effet chaulant).

## 2.3.3 QUEBEC

### 2.3.3.1.1 Incorporation dans les ciments

L'IRDA, institut de recherche et de développement en agroenvironnement, a récemment mené des études sur les émissions de particules et la production de cendres issues de la combustion de biomasses. Les études suivantes apportent des informations sur la qualité des cendres et sur les possibilités d'incorporation dans le ciment.

- Bilan énergétique, émissions gazeuses et particulaires de la combustion de la biomasse à la ferme. Mars 2012
- Etude des émissions gazeuses et particulaires de la combustion de biomasses agricoles et forestières. 2012
- Value-addition of residual ashes from different biomass origins in cement based material: a comparative study. Septembre 2011

Les propriétés chimiques des cendres de biomasse ont été analysées pour déterminer leur potentiel d'utilisation dans les bétons. Les biomasses testées comprenaient bois, fraction solide du lisier de porc, le panic raide et le saule. Les résultats de l'étude conduisent aux conclusions suivantes :

- 1. Il existe une relation étroite entre les propriétés chimiques de la biomasse initiale et les cendres.
- 2. Les cendres volantes de biomasse présentent une teneur en Cl élevée.
- 3. Les **cendres volantes** ont un contenu  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$  (propriétés pouzzolaniques) insuffisant pour répondre aux spécifications de la norme ASTM (norme américaine équivalente à la norme E-450). Ainsi elles ne sont pas appropriées en tant que substitut du ciment dans les bétons.
- 4. Le Cl contenu dans les cendres de biomasse est élevée et très variable.
- 5. Les **cendres sous foyer** de panic, riches en silice, pourraient potentiellement être utilisées dans des bétons, car elles respectent les spécifications chimiques pour la désignation de classe C de la norme ASTM.

## 3 Traitement de déchets

### 3.1 Stabilisation de déchets spéciaux stockés en ISDD, et principalement des mâchefers

Une tonne d'OM incinérée conduit à la production d'environ 30 à 50 kg de REFIOM qu'il faut traiter et stabiliser.

Trois techniques existent pour stabiliser ou solidifier les REFIOM et réduire leur caractère polluant ainsi que leur capacité de relargage de polluants dans le milieu :

- Stabilisation / solidification : traitement physico-chimique avec l'utilisation de **liants hydrauliques** comme le ciment, la chaux,... Cette technique est utilisée par presque toutes les installations d'incinération.
- Vitrification : traitement physico-chimique avec chauffage du déchet à très haute température ou enrobage dans une matrice verrière.
- Enrobage par liants organiques : traitement physico-chimique avec l'utilisation de bitume ou d'une matrice plastique. Cette technique est très coûteuse donc peu utilisée.

Les REFIOM peuvent ensuite stockés en centre de stockage.

L'utilisation de liants hydrauliques est donc la technique la plus courante : **les cendres volantes de chaufferies biomasse, dont le coût de traitement est élevé, pourraient être intégrées dans les préparations** en raison de leur caractère neutralisant (CaO) liée à leur contenu en chaux vive.

Les cendres volantes de biomasse présentent un pouvoir neutralisant incontestable, voire une capacité de remplissage du mélange final, mais contrairement à une chaux par exemple, contiennent des éléments préjudiciables à l'objectif de stabilisation d'inertie recherché :

Ainsi, les teneurs en éléments suivants (Fraction soluble globale principalement, chlorures, Na, K et S(sulfate) doivent être limitées pour valider et pouvoir justifier leur utilisation.

L'objectif est notamment de réduire la solubilité des éléments contenus dans les REFIOM : il n'est donc pas pertinent d'apporter des cendres présentant une fraction soluble trop élevée.

Compte tenu de l'importance de la fraction soluble dans les cendres, seule l'utilisation pour la stabilisation des REFIOM traités à la chaux est envisagée (les REFIOM traités au bicarbonate de soude sont très solubles).

Les cendres volantes pourraient être incorporées à raison de 1/3 du mélange stabilisant (deux autres produits sont nécessaires)<sup>57</sup>.

En France, plusieurs papetiers valorisent une partie de leurs cendres volantes en stabilisation de déchets industriels spéciaux.

### 3.2 Neutralisation de rejets aqueux acides

La neutralisation d'un effluent consiste à ramener son pH (par acidification ou alcalinisation) à une valeur fixée en fonction des besoins (ex : entre 7 et 10,5 pour la précipitation des métaux sous forme d'hydroxydes). Les cendres peuvent être valorisées pour neutraliser certains effluents liquides, notamment issus de traitements de surfaces ou des drainages acides provenant des résidus miniers. Il existe peu de références dans la littérature pour ce mode de valorisation.

## 4 Industrie énergie

### 4.1 Applications

Les applications possibles sont notamment les suivantes :

- Extraction des métaux par traitement chimique ou électrochimique
- Charge dans les métaux ou polymères
- Extraction de phosphore pour la production d'engrais
- Production de sols pour cultures hors sol

### 4.2 Programmes de recherche/R&D, essais, démonstration...

#### 4.2.1 FRANCE

- Plasturgie : programme PLASTICENDRE (voir détail des résultats en annexe)

---

<sup>57</sup> Bruno Gilardin (SARP). Communication personnelle janvier 2015.

Le projet Plasticendre est un projet français débuté en 2012 visant à mettre en place une nouvelle filière de valorisation pour les cendres volantes produites par une papèterie qui produit du papier à partir de papiers recyclés et des bois de trituration. Cette filière doit permettre la prise en charge d'une grande quantité de cendres mais elle doit en plus être stable et pérenne. Ce projet prévoit l'utilisation des cendres volantes dans l'industrie de la plasturgie en tant que charge minérale. Actuellement, les charges couramment utilisées sont le talc et le carbonate de calcium. Globalement, le programme PLASTICENDRE a montré que la plupart des critères exigés par l'industrie de la plasturgie étaient respectés mais qu'un certain nombre d'analyses étaient encore nécessaires.

#### 4.2.2 PROGRAMMES EUROPEEN

Le programme BIOREFINE conduit notamment un programme de développement des techniques de récupération des nutriments (NPK) ainsi que des éléments traces métalliques à partir de déchets tels que les cendres.

#### 4.2.3 DANEMARK

- Extraction des éléments traces métalliques de cendres volantes par électrodialyse (2000-2013)<sup>58</sup>

Les travaux ont notamment porté sur la réduction du cadmium dans les cendres volantes, cet ETM étant un facteur limitant pour le retour au sol. Les essais ont concerné plusieurs types de biomasses (paille, bois).

En dépit de ces grandes variations entre les cendres, la méthode électrodialytique a montré sa robustesse pour réduire la concentration de Cd à moins de 2,0 mg Cd / kg de MS pour des valeurs initiales entre 8,8 et 64 mg/kg MS.

Ces méthodes sont par ailleurs testées pour les cendres volantes de charbon et les cendres volantes d'incinération.

- Séparation des éléments minéraux fertilisants et des éléments traces métalliques des cendres<sup>59</sup>
  - KOMUNNEKEMI

Le procédé a été développé par KOMMUNEKMI dans les années 2000, pour extraire notamment le phosphore fr cendres non de biomasse épandables en raison de leur teneur en éléments traces trop élevées.. Les coûts élevés de la méthode semblent avoir mis à mal le développement à grande échelle de cette voie de valorisation.

- DONG Energy's

On peut citer aussi le procédé a été développé par DONG Energy dans les années 2000, pour extraire notamment la potasse de cendres non de biomasse épandables en raison de leur teneur en cadmium trop élevées.

#### 4.2.4 FINLANDE<sup>60</sup>

En Finlande, des programmes de R&D, adossés à l'usine de cogénération de Keljonlahti produisant 50 000 tonnes de biomasse, ont été conduits entre 2009 et 2011 : ces travaux ont notamment porté sur l'extraction des métaux pour améliorer la qualité des cendres.

#### 4.2.5 NORVEGE

La Norvège étudie (programme en cours) les perspectives d'utilisation des cendres de biomasse dans les sols artificiels des cultures sous serres notamment.

## 5 Combustion des cendres

Les cendres contiennent des matières volatiles (« imbrûlés ») en quantités plus ou moins importantes (de l'ordre de 2 à 30 % sur brut), qui peuvent être d'une part indésirables pour certains modes de valorisation (matériaux principalement : bitumes, céramiques, bétons mais également granulation...)

---

<sup>58</sup> Gunvor M. Kirkelunda, Anne J. Damoeb, Lisbeth M. Ottosen. Electrolytic removal of Cd from biomass combustion fly ash suspensions. Journal of Hazardous Materials. Volumes 250–251, 15 April 2013, Pages 212–219

<sup>59</sup> Renewable Energy and Transpor. Utilization of Ash Fractions from Alternative Biofuels used in Power Plants. Juin 2008

<sup>60</sup> KEMA. Options for increased utilization of ash from biomass combustion and co-firing. Mars 2012.

car limitant les propriétés de liaison entre les matériaux, et d'autre part constituent une source d'énergie potentielle.

Dans l'industrie, la valorisation énergétique des imbrûlés dans les cendres est parfois mise en œuvre :

- soit directement dans l'installation : certaines installations recirculent les cendres pour réduire le taux d'imbrûlés (exemple : cendres de dépoussiéreurs sur des grosses installations industrielles). Cette technique présente des inconvénients : augmentation des temps de séjour et augmentation de la turbulence.
- en cimenterie, certaines cendres, riches en imbrûlés et destinées à compléter les ciments, sont incorporées en aval du process et sont incinérées avec le cru, en raison de leur potentiel énergétique.

Dans les années 2000, des essais d'extraction des imbrûlés par tri granulométrique puis de gazéification ont abouti à des résultats prometteurs<sup>61</sup>. La technique, qui était appliquée à des cendres sous foyer issues de four à grille, a permis d'identifier les fractions les plus riches en matière organique et évaluer leur part dans le volume total des cendres. La recherche a montré que la séparation industrielle du carbone (fraction riche en carbone) peut être réalisée en utilisant des tamiseuses à l'échelle industrielle. L'élimination maximale de carbone a été obtenue pour une extraction de la fraction granulométrique supérieure à 425 µm ou lorsqu'une séparation par flottaison a été mise en œuvre. Cette conclusion a été réalisée par analyse thermogravimétrique.

## 6 Focus sur les modes de valorisation des cendres issues de l'incinération des boues

Les informations ci-après sont principalement reprises de la thèse réalisée en 2012 par Maozhe Chen : Faisabilité technique et environnementale de l'utilisation dans des matériaux de construction cimentaires de cendres d'incinération de boues de station d'épuration. Elles sont également illustrées par des exemples recensés dans le cadre de la présente étude.

Actuellement, la plus grande partie des cendres de boues produite est stockée en décharge de classe I ou II (les cendres minérales peuvent être classées sous la rubrique 19 01 14 et ne sont donc pas des déchets dangereux).

La valorisation des cendres en épandage agricole n'apparaît souvent pas comme une filière de gestion acceptable, compte-tenu de la concentration en polluants, et notamment en métaux lourds, dans les cendres. Plusieurs pays ont, dans ce contexte, prévu la stabilisation des cendres avant leur mise en décharge, afin d'immobiliser les éléments polluants.

Jusqu'à présent, les différentes techniques de valorisation ont été plus ou moins largement étudiées selon le coût qu'elles représentent, tout en tenant compte du contexte réglementaire.

Les REFIB (résidus des fumées d'incinération des boues) sont traités. La société HYDROPALE à Dunkerque les dépollue avant de rejeter la fraction soluble dans le bassin maritime ; la fraction soluble est donc en quelque sorte valorisée.

### 6.1 Enfouissement

Jusqu'en 2012, les cendres d'incinération de boues de station d'épuration du Havre (76) étaient évacuées en ISDD (« classe 1 ») mais sont désormais valorisée en aménagement de décharge en Allemagne. Les analyses du comportement à la lixiviation des cendres de boues dépassent en général les seuils des ISDD pour la fraction soluble (30 à 40 % pour un seuil à 10 %).

### 6.2 Valorisation des cendres pour leur teneur en phosphore

Les cendres issues de l'incinération des boues d'épuration sont riches en phosphore. En effet, la teneur de cet élément dans les cendres est comprise entre 4 % et 9 %. L'extraction du phosphore peut être réalisée à l'acide sulfurique, au chlore.

### 6.3 Utilisation en tant que matériau de recouvrement ou de revêtement dans les centres de stockage

Les matériaux de revêtement ou de recouvrement d'une décharge sont utilisés pour limiter les transferts liquides (lixiviat) et gazeux (biogaz). Les matériaux utilisés classiquement sont les argiles.

<sup>61</sup> Adrian K. James \*, Ronald W. Thring, Steve Helle and Harpuneet S. Ghuman. Ash Management Review—Applications of Biomass Bottom Ash. Energies 2012, 5, 3856-3873. Octobre 2012

Dans la bibliographie, des auteurs (Okoli et Balafoutas, 1998) ont montré les avantages liés à l'utilisation des cendres en tant que matériaux de recouvrement des centres de stockage. En effet, les cendres compactées en une masse dense peuvent être considérées comme agent possible d'étanchéité de la décharge.

Certaines cendres de boues françaises sont expédiées en Allemagne en tant que matériaux d'aménagement les cendres de boues de la CODAH (76) sont évacuées en Allemagne pour être valorisées à Kaiserslautern par la société TERRAG (aménagement et exploitation des décharges).

## **6.4 Utilisations des cendres en tant que produits ou additifs de traitement**

### **6.4.1 STABILISATION DE SOL DE FONDATION**

Les cendres issues de l'incinération des boues d'épuration présentent un caractère pouzzolanique (Zhu et al, 2004; Davraz et Gunduz, 2005; Turanli et al, 2004). Ainsi, les cendres de boues d'épuration et la chaux hydratée peuvent être utilisées pour améliorer les propriétés et la résistance du sol de fondation cohésif souple (Chen et Lin, 2009(a)).

### **6.4.2 UTILISATION DANS LE DOMAINE DU TRAITEMENT DES EFFLUENTS LIQUIDES**

En plus de leur richesse en silicium et en aluminium, les cendres de boues d'épuration offrent des caractéristiques intéressantes en termes de surface spécifique et d'échange ionique (Pan et Tseng, 2001). Ainsi, il a été montré qu'elles ont la capacité à éliminer les métaux lourds, et notamment le cuivre des eaux usées (Pan et al, 2003).

## **6.5 Valorisation des cendres en tant que matières premières secondaires**

Ces filières ont fait l'objet d'études focalisées sur les aspects techniques. Dans tous les cas, la faisabilité technique a été démontrée mais dans la plupart des cas, aucune évaluation environnementale n'a été mise en œuvre. Cette étape serait indispensable avant tout développement à l'échelle industrielle.

### **6.5.1 VALORISATION DES CENDRES DANS LES PRODUITS CERAMIQUES**

La céramique peut être produite à partir des cendres de boue seules ou en mélange avec des additifs (kaolin, montmorillonite, illites, poudre de verre plat) auxquelles on applique un traitement thermique.

### **6.5.2 VALORISATION DES CENDRES COMME FILLER MINERAL DANS LES REVETEMENTS BITUMEUX**

Une étude a montré que les cendres de boues d'épuration peuvent être utilisées en tant que filler minéral dans le pavage bitumineux (Sayed et al, 1995).

### **6.5.3 FABRICATION DE TUILES ET DE BRIQUES**

Les cendres issues d'incinération des boues d'épuration peuvent être ajoutées à l'argile pour fabriquer des tuiles et/ou briques. Dans le procédé de fabrication, un des paramètres important est la température atteinte au cours du traitement thermique. Il a été rapporté qu'un taux de remplacement d'argile par les cendres de boues de 20 % permet de satisfaire les exigences de la norme nationale chinoise (CNS) pour les briques secondaires.

### **6.5.4 VALORISATION DES CENDRES EN GRANULATS DE FAIBLE DENSITE**

Les granulats légers sont, par conséquent, utilisés pour produire du béton léger et d'autres produits de construction légère. Ils sont également utilisés dans d'autres applications telles que le remplissage géotechniques légers, les produits d'isolation, l'ingénierie des sols, l'hydro-culture, le drainage et les filtres. Les études rapportent que les granulats fabriqués à partir des cendres présentent une densité inférieure à celle d'un agrégat léger disponible dans le commerce. De même, l'absorption d'eau des agrégats contenant des cendres est plus faible. Toutefois, ces agrégats présentent une résistance à la compression comparable à celle des agrégats usuels.

### **6.5.5 FABRICATION DE MATERIAUX LEGERS A BASE DE CENDRES**

Les cendres de boues d'épuration peuvent être utilisées dans des matériaux d'isolation thermique. En effet, elles présentent une structure poreuse et des particules irrégulières, ce qui permet d'obtenir des matériaux à faible conductivité thermique.

### **6.5.6 VALORISATION DES CENDRES DANS LE DOMAINE DE LA CONSTRUCTION**

L'incorporation de cendres de boues d'épuration en remplacement du ciment ou du sable dans les matériaux cimentaires est également signalée dans quelques études récentes.

Les essais réalisés en 2012 dans le cadre de la thèse « Faisabilité technique et environnementale de l'utilisation dans des matériaux de construction cimentaires de cendres d'incinération de boues de station d'épuration » indiquent :

- que la caractérisation physique et chimique des cendres étudiées de leur réactivité a révélé un comportement intermédiaire entre le ciment et le sable, proche du comportement de matériaux pouzzolaniques ;
- La résistance du mortier diminue quand le taux de substitution augmente à cause de la faible teneur en CaO dans les cendres et de l'apport supplémentaire d'eau nécessaire.
- Pour le béton avec un taux de substitution de 10 %, la résistance est comparable à celle du béton témoin.
- L'essai de durabilité des matériaux cimentaires incorporant les cendres révèle une forte diminution de résistance mécanique sous l'effet de la sollicitation au gel/dégel.

## 7 Synthèse des applications et post-traitement mis en œuvre et envisageables

Le tableau suivant dresse la liste des principales applications et post-traitements mis en œuvre et envisageables pour les cendres de biomasse.

**Tableau 36 : Principales applications et post-traitements**

	Application	Maturité	Type de cendres
Elimination	Stockage	****	Toutes
	Post-traitement : stabilisation en cas de fraction soluble trop importante	80-100 €/t cendres sous foyer 200-400 €/t cendres volantes	
Recyclage agricole	Retour au sol comme amendement calcique principalement sur des sols agricoles (France notamment) et forestiers (Autriche, Allemagne, Suède).	**** (agriculture) 35-50 €/t agriculture  ** (forêt) 50-100 €/t forêt	Cendres sous foyer et cendres grossières issues du dépoussiérage (en mélange avec les cendres sous foyer) d'équipements à grilles ou à lit fluidisé.  Dans certains cas, cendres sous grilles seules.
	Incorporation à la production de composts (Autriche et Allemagne). En France cette pratique est autorisée sous certaines conditions (cendres normalisée, plan d'épandage...).	***	
	Mélange avec des sous produits (digestats...)	Boues : * Autres : R&D	
	Post-traitements : broyage, criblage, déferrailage, granulation	**	
Bâtiment / matériaux de construction	Cimenterie (pouvoir pouzzolanique) Béton (charge, additifs) Bitumes (charge) Production de briques (substitut du sable)	R&D à *	Principalement cendres volantes de bois d'équipements à grilles ou à lit fluidisé.  Cendres sous foyer.
	Post-traitements : broyage, criblage, déferrailage, extinction de la chaux vive, traitement des chlorures, des imbrulés...	R&D à *	
Génie civil / travaux publics	Techniques tourières : - Remblai - Sous-couches de formes - Liants de stabilisation/stabilisation de sols	R&D à **	Cendres volantes de bois d'équipements à grilles ou à lit fluidisé. Cendres sous foyer.  Cendres volantes pouvant être écartées
	Post-traitements : broyage, criblage, déferrailage, mélanges	**	
	Aménagement de décharges Remblai de carrières, comblement de mines Stabilisation de matériaux de dragage	**	Cendres volantes principalement
Industrie	Céramique	R&D à *	Cendres volantes d'équipements à grilles ou à lit fluidisé.
	Plasturgie (charge minérale)	R&D	
	Traitement de déchets dangereux, effluents	R&D à *	
	Extraction de métaux, d'éléments fertilisants	** / cout élevé	
	Géo polymères, éco-liants	R&D	

\* à \*\*\*\* : peu mature à très mature

R&D : au stade de R&D

## Volet 5 : Limites et propositions d'amélioration

Ce paragraphe, après un rappel des principaux freins au recyclage des cendres, propose quelques pistes de réflexion d'ordre technique et réglementaire, que l'étude a pu faire émerger, ou insiste sur certaines identifiées et considérées comme importantes pour le développement du recyclage des cendres de biomasse.

La valorisation des cendres leur confère une valeur ajoutée, qui rejillit sur la filière biomasse énergie dans son ensemble. Le développement du bois énergie, qui participe à l'atteinte des objectifs européens en matière de production d'énergie renouvelable, passe par la structuration de l'approvisionnement mais doit aussi prendre en compte la gestion des cendres afin de consolider la filière, mise à mal aujourd'hui par le faible coût des énergies fossiles.

La multiplication et la diversité des applications possibles participe du développement de l'économie circulaire, en rapprochant les exutoires des lieux de production et en permettant de retenir les solutions les plus vertueuses (ex : le déchet d'une industrie est recyclé en matière première d'une autre industrie).

### 1 Limites techniques et réglementaires

On constate aujourd'hui que les différents modes de valorisation des cendres, en dehors du retour au sol, présentent des limites qui freinent leur développement. On peut citer :

- Le caractère diffus du gisement (hors gros industriels (papeteries) et installations de cogénération dans le cadre des appels à projet biomasse en France). Par exemple, cette situation est préjudiciable à la valorisation en techniques routières qui nécessitent des flux importants à chaque chantier.
- La forte variabilité des cendres
  - intrants variables au cours de l'année en particulier pour les installations industrielles de co-combustion (papetiers...),
  - taille de l'installation : plus d'imbrulés dans les petites installations...,
  - type d'équipement de combustion (sable dans les lits fluidisés...),
  - conduite de l'installation (fonctionnement en sous-régime par exemple),
  - mélange des différentes cendres de l'installation,
  - etc.
- Le manque de connaissance sur la taille et la forme des particules en fonction des différents types de cendres.
- Des facteurs limitant selon les applications :
  - chaux vive, chlorures pour les utilisations en céramiques, bétons et ciment de masse,
  - carbone organique total (imbrulés) pour la production de ciment, bitume...,
  - métaux lourds pour le retour au sol : agriculture ou forêt principalement mais également construction, matériaux secondaires,
  - granulométrie : par exemple, les cendres volantes, trop fines, ne sont pas adaptées à la valorisation en céramiques,
  - taux d'humidité/pulvérulence,
  - concrétions (« mâchefers ») : toutes les valorisations sont concernées excepté éventuellement certaines applications en techniques routières ou le comblement en substitution de mâchefers d'UIOM (unité d'incinération des ordures ménagères).
- Une difficulté plus grande pour valoriser les cendres volantes, plus chargées en métaux lourds.
- Une réglementation peu adaptée aux cendres de biomasse (les cendres de biomasse ne sont pas citées dans la plupart des normes relatives à la construction) dissuasive, conjuguée à des coûts de prétraitements parfois rétroactifs (extinction de la chaux, traitement thermique...).
- Des coûts de décharge dans certains pays (France notamment, le coût de l'enfouissement est en moyenne de 80-100 €/t) qui n'incitent pas à développer d'autres modes de valorisation.
- Un retour d'expérience insuffisamment partagé en Europe.
- Une production de cendres exponentielle ces dernières années avec le développement de la biomasse énergie, et des producteurs « pris de court » pour trouver des solutions adaptées et économiques.

## 2 Propositions pour favoriser le recyclage des cendres

A l'issue de l'état des lieux de la filière, quelques propositions et idées fortes émergent pour favoriser le recyclage des cendres et éviter leur élimination en décharge :

- conforter le retour au sol des cendres sous foyer, seule filière disposant d'un potentiel industriel ;
- soutenir les valorisations alternatives les plus prometteuses, y compris pour les cendres volantes ;
- structurer la filière.

### 2.1 Conforter la filière agricole pour les cendres sous foyer

Cette filière de recyclage est actuellement la plus robuste et la plus applicable massivement aux cendres sous foyer : elle est structurée et dispose d'un véritable potentiel industriel. En l'absence de véritable concurrence actuellement et dans l'attente de nouveaux débouchés potentiels, cette filière doit être consolidée car, outre son intérêt agronomique et environnemental, elle participe à la réduction des coûts de la filière bois énergie dans son ensemble. Le retour au sol et en particulier la filière agricole est en France (voire en Europe) la seule voie éprouvée de recyclage des cendres sous foyer. On estime à **70-80 % les flux de cendres sous foyer** épandues en agriculture en France, le reste de la production étant éliminée en décharge de classe 2 (installation de stockage de déchets non dangereux).

La fragilisation de cette filière pourrait potentiellement aboutir à **l'enfouissement de plus de 100 000 tonnes de cendres** actuellement épandues en agriculture.

Compte tenu du réel intérêt environnemental de cette voie de valorisation (plusieurs milliers de tonnes d'engrais du commerce et de chaux substitués), à défaut aujourd'hui d'alternative suffisamment aboutie, il semble nécessaire de conforter cette solution pour l'installer durablement. En parallèle, le retour au sol en forêt doit être expérimenté à une échelle suffisamment importante pour valider sa pertinence.

#### 2.1.1 AMELIORER LA QUALITE DES CENDRES

##### 2.1.1.1 En améliorant la qualité de l'approvisionnement

La qualité de l'approvisionnement a une forte incidence sur la qualité des cendres, y compris dans les chaufferies biomasse collectives ou les approvisionnements peuvent être différents d'une installation à l'autre.

**Tableau 37 : Deux qualités de cendres sous foyer de chaufferie collective au bois (photos CEDEN)**



L'interdiction depuis 2013 en France de valoriser des déchets bois ne répondant pas à un cahier des charges stricte en chaufferie (sortie de statut de déchets des déchets bois) est de nature à améliorer la qualité des cendres. Toutefois, on constate encore sur certaines installations des qualités de cendres très médiocres. La qualité de l'approvisionnement passe notamment par des clauses précises imposées dans les cahiers des charges des collectivités vis-à-vis de leur exploitant et des exploitants à l'égard des structures qui les approvisionnent.

L'extraction par voie humide présente des avantages mais est aussi responsable de prise en masse des cendres et de l'augmentation de leur poids.

##### 2.1.1.2 En améliorant la connaissance sur les post-traitements

Outre la nécessité de mieux caractériser certains éléments comme la valeur neutralisante ou la disponibilité des éléments (cf. points suivants), il ressort que le post-traitement des cendres avant

épandage est peu ou mal connu et rarement maîtrisé. La présence possible de concrétions (cf. photo suivante), de métaux, la pulvérulence des cendres impliquent des traitements comme l'humidification, le broyage, le déferrailage et le criblage.

**Tableau 38 : Exemple de concrétion d'une vingtaine de cm dans des cendres d'une chaufferie collective (photo CEDEN)**



Ces méthodes de post-traitement, qui pourraient être applicables pour d'autres voies de valorisation, nécessitent d'être mieux appréhendées et testées.

Par ailleurs, le stockage des cendres reste insuffisamment maîtrisé sur les plans logistique et réglementaire et doit également être mieux appréhendé.

Enfin, il semble intéressant d'explorer davantage les synergies de mélange entre les digestats des installations agricoles notamment et des cendres de biomasse.

#### 2.1.1.3 En renforçant la traçabilité

L'arrêté du 26 août 2013 prévoit une caractérisation par lot des cendres de biomasse sans cependant fixer d'objectifs quantitatifs. Or, il est impensable d'imposer la même règle à une chaufferie collective de 2 MW, qui produira 40 t de cendres par an, et une chaufferie industrielle 20 MW, qui en générera 1 400 t/an. En s'inspirant de l'arrêté de 1998 sur l'épandage des boues d'épuration par exemple, on propose d'adapter le nombre d'analyses en fonction des quantités de bois consommées ou de cendres produites.

#### 2.1.1.4 Complémentarités des sous-produits

Les programmes européens transfrontaliers (BIOREFINE, ECOBIOGAZ) étudient l'intérêt des mélanges de sous-produits : effluents d'élevage, boues d'épuration, digestats, cendres.

Ces sous-produits sont parfois complémentaires : boues riches en N-P et cendres riches en CaO-K, effluents d'élevages acides et cendres basiques, digestats liquides et cendres sèches, etc. Il s'agit aujourd'hui principalement de pistes de réflexion ou d'essais mais qui méritent d'être davantage étudiés. Par ailleurs, la valorisation de ces sous-produits est confrontée à des problématiques communes (logique déchets principalement) ce qui renforce l'intérêt d'étudier les synergies de mélange.

En France, la Bretagne qui est soumise à des contraintes comparables à la Belgique, pourrait être le terrain d'expérimentations, voire de la mise en place d'un pilote. A ce titre, la France pourrait être le fer de lance d'un nouveau programme collaboratif sur cette thématique, qui pourrait s'appuyer notamment sur les travaux réalisés dans le cadre du programme 2012-2014 VALDIPRO de mise sur le marché des digestats.

### 2.1.2 PRECISER LE CADRE REGLEMENTAIRE

Au niveau du retour au sol, le cadre réglementaire et normatif devrait évoluer favorablement à court et moyen terme. A minima, le cadre permettra d'apporter plus de visibilité à la filière.

#### 2.1.2.1 Préciser les arrêtés épandage

En France, l'épandage agricole est confronté à une difficulté qui pourrait porter préjudice à la filière (obligation de caractériser les cendres grossières avant de les mélanger aux cendres sous foyer), les coûts d'analyse étant très élevés ramenés à la tonne de cendres, en particulier pour les petits gisements. Le CIBE pourrait initier à court terme une étude pour améliorer la connaissance sur ce sujet et disposer d'arguments techniques, économiques et agronomiques pour justifier l'organisation qui prévalait jusqu'alors, les analyses de cendres en mélange étant effet très majoritairement

conformes aux limites réglementaires (plus de 95 % des cendres sous foyer sont conformes aux seuils de l'épandage).

S'agissant du retour en forêt, l'épandage est depuis 2013 enfin possible en France sous certaines conditions mais le cadre reste trop flou pour développer rapidement une filière. Le programme français en cours sur les conditions de retour des cendres en forêt (ICIF) vise à faire évoluer la réglementation pour mieux encadrer cette filière et favoriser son développement.

#### 2.1.2.2 Faire évoluer le cadre normatif pour les engrais et les amendements

Alors que les boues d'épuration peuvent être facilement normalisées grâce à l'apport de déchets verts, le cadre normatif est peu favorable aux cendres, résidus de la combustion de biomasse naturelle ! L'évolution du cadre normatif devrait évoluer favorablement à l'horizon 2016-2017, par la prise en compte des cendres de biomasse, en tant que matières premières, pour les normes amendements basiques et par le possible abaissement des valeurs en NPK (norme engrais).

Ainsi normalisées, les cendres seraient facilement utilisables en tant que matières premières en mélange à différents produits :

- Engrais Minéraux organiques et organo-minéraux 42-001.
- Amendements organiques (NF U 44 051, NF U 44 551 et NF U 44 095).
- Supports de cultures.
- Boues (pour structuration, fertilisation).
- Co produits (digestats, lisiers...).

#### 2.1.2.3 Harmoniser et adapter les réglementations en Europe

Une harmonisation de la législation et des lignes directrices au niveau européen est une priorité pour faciliter la valorisation des cendres de biomasse et limiter l'enfouissement. Dans le domaine agricole notamment, il existe presque autant de législations et de stratégies (possibilité d'épandre ou pas, incorporation aux composts ou pas, cadre normatif ou pas, valeurs seuils en éléments polluants...) que de pays... Cette diversité des approches et cette absence de lignes directrices ne sécurisent pas opérateurs à l'échelon national, qui manquent de visibilité à moyen terme en raison de possibles évolutions, potentiellement plus contraignantes.

Pour le retour au sol, l'harmonisation du règlement 2003/2003 (horizon 2017-2020) devrait permettre d'avoir une même réglementation transfrontalière et européenne sur les cendres et autres co-produits valorisables en Agriculture. A moyen terme cette réglementation pourra être substituée à l'ensemble des normes nationales sur les fertilisants (en France/ 42-001-2 3, 44-051, 44-001, 44-551, 44-095...). Cette réglementation pourrait supplanter la réglementation française pour les produits décrits dans la réglementation européenne. Les cendres seraient prises en compte avec un cahier des charges commun aux autres produits pour les éléments-traces métalliques.

### 2.1.3 DEVELOPPER ET FAVORISER LES DEMARCHES D'AMM ET/OU DE CERTIFICATION

#### 2.1.3.1 Suggestion 1 : dérogation pour une démarche de « mise sur le marché » collective

De nombreux producteurs sont dissuadés par la durée de la démarche de l'autorisation de mise sur le marché (nouvelle appellation de l'ancienne démarche d'homologation). Pourtant cette démarche est très bien adaptée à des industries qui produisent des quantités importantes de cendres et stables du point de vue de la qualité. Une **procédure collective** sur le modèle des digestats (c'est-à-dire non plus par site) pour faciliter la mise sur le marché des digestats pourrait être adaptée au domaine des cendres.

#### 2.1.3.2 Suggestion 2 : la mise en place d'une certification qualité

La mise en place d'une certification, par les producteurs de cendres, avec des contraintes supérieures à celles fixées par la réglementation épandage, pourrait améliorer l'image des cendres et tirer la filière vers le haut. Cette certification peut être nommée **QUALICENDRE**<sup>62</sup>. Ce type de certification existe par exemple pour les composts issus d'ordures ménagères.

Le but est de qualifier et d'évaluer les cendres de façon fine pour l'utilisateur final (agriculteur, BTP). Selon un cahier des charges réglementaire (déchets, conforme non conforme pour un usage produit normalisé ou matière première) et ciblé (déchet, produit basique, niveau de qualité, filière excellence) afin de donner un prix adapté (ex : certification AFNOR TERREAU).

---

<sup>62</sup> Proposition suggérée par CEDEN

La certification est réalisée par un organisme dédié ou des organismes indépendants (ex : laboratoires accrédités).

Elle pourrait classer les cendres en plusieurs catégories : A, B, C... : filière d'excellence agricole, usage en tant que co-produit/matière première, autres usages...

#### **2.1.4 EVALUER LE POTENTIEL EN FORET ET ADAPTER LA REGLEMENTATION**

Cette filière éprouvée dans les pays scandinaves, en Autriche et en Allemagne fait l'objet de travaux importants en France depuis 2 ans. Cette filière présente de nombreux intérêts :

- retour en forêt des éléments exportés (plaquettes),
- circuits courts, économie circulaire,
- amélioration des sols forestiers et augmentation de la production,

Elle souffre toutefois d'un manque de connaissance sur les traitements avant épandage et d'un coût actuellement supérieur à la décharge, donc dissuasif.

##### **• Evaluer le potentiel**

Au-delà des essais et programmes de démonstration réalisés et en cours (UCFF, ADEME), il semble intéressant d'évaluer le potentiel d'épandage en France en réalisant une analyse multicritères. Ces critères sont en première approche :

- Régime forestier : privé, communal, domanial.
- Surface des parcelles/morcellement : il n'est pas envisageable d'épandre sur des zones très morcelées impliquant des dizaines de propriétaires.
- Sensibilité des sols. Dans certains secteurs, il est fortement conseillé de laisser les rémanents, riches en éléments minéraux, sur les parcelles de coupe. L'apport de cendres pourrait compenser l'exportation des rémanents.

Cette analyse pourrait être réalisée en partenariat avec l'IGN (ex-IFN).

##### **• Faire simple**

Sauf soutien financier spécifique des pouvoirs publics/obligation réglementaire/cahier des charges de la filière imposant cette solution, le retour en forêt ne sera possible que si son coût est inférieur ou égal à celui du recyclage en agriculture. Dans le cas contraire, cette filière restera, au mieux, une simple alternative en cas d'impossibilité d'épandage sur sols agricole. Son développement passe donc par des traitements simples sur le modèle du recyclage agricole : les porteurs des programmes en cours doivent impérativement prendre en compte cette nécessité de pragmatisme pour éviter à la filière de s'enliser en raison de contraintes techniques trop fortes.

##### **• Adapter le cadre réglementaire**

Enfin d'un point de vue réglementaire, le recyclage en forêt est autorisé en France depuis 2013 (la possibilité d'épandre les cendres en forêt figure dans l'arrêté du 26 août 2013 relatif aux installations de combustion soumises à déclaration). Toutefois, les modalités d'épandage décrites dans l'arrêté sont adaptées au retour sur parcelle agricole et ne prennent pas en compte les spécificités du contexte forestier. Notamment, l'épandage des cendres est interdit sur parcelles dont le pH est inférieur à 5 : or, il est très courant que l'acidité des sols forestiers soit très inférieure à ce seuil.

## **2.2 Soutenir les alternatives au retour au sol les plus prometteuses**

### **2.2.1 FAIRE DES ARBITRAGES / FIXER DES PRIORITES POUR GAGNER EN EFFICACITE**

Il ressort des retours d'expérience (démonstrations, programmes de R&D...) sur les alternatives au retour au sol ces 10 années plusieurs enseignements principaux :

- L'intérêt agronomique des cendres est démontré et largement admis, principalement en agriculture. Pourtant, hormis en France, l'enfouissement semble prédominant en Europe.
- Aucune alternative (au retour au sol pour les cendres sous foyer et à la décharge pour les cendre volantes) structurée et pouvant disposer d'un potentiel de développement industriel, et généralisable n'est identifiée.
- Certaines pistes semblent sans avenir, excepté pour des gisements très spécifiques (bétons, cimenterie, plasturgie, briquetterie) alors que d'autres semblent plus prometteuses (céramique, techniques routières/TP, forêt).
- Les nombreux résultats issus des travaux sont insuffisamment partagés et/ou connus. En conséquence, il semble que certains programmes lancés récemment exploitent insuffisamment les retours d'expérience, au risque de refaire ce qui a déjà été fait.

Il apparaît nécessaire de disposer à terme d'alternatives au retour au sol pour assurer le maximum de recyclage, en cas de difficulté sur la filière agronomique, et donc de soutenir les démarches les plus prometteuses.

La céramique semble constituer une voie de valorisation pertinente, notamment pour la production de tuiles. Le programme CERACENDRE, qui est reconduit, concerne aujourd'hui des cendres sous foyer, notamment pour des raisons de granulométrie, mais l'utilisation de cendres volantes pourrait peut-être à terme à examiner plus avant. La céramique présente l'avantage de piéger les éventuels polluants (métaux).

Les techniques routières sont également une solution à examiner davantage : en effet cette application est possible pour d'autres déchets comme les mâchefers d'incinération ou de centrales à charbon. Des post-traitements pourront être nécessaires pour répondre aux exigences techniques, réglementaires et environnementales de cette filière.

D'autres applications concernant les **cendres volantes** (techniques routières, traitement de déchets comme les REFION<sup>63</sup> ou le REFIDIS<sup>64</sup>...) doivent être soutenues pour tenter de trouver des alternatives à l'enfouissement quasi systématique de ce type de cendre cendres. En effet ces cendres sont aujourd'hui quasi exclusivement évacuées en installation de stockage de déchets non dangereux ou dangereux selon leurs caractéristiques (on rappelle que les cendres volantes ne sont pas des déchets dangereux au sens de la nomenclature sur les déchets).

Les applications concernant la cimenterie, l'incorporation à des bétons, la briqueterie, et utilisant les cendres comme additif, charge ou matériau de substitution n'ont à ce jour **pas ou peu fait la preuve de leur réel intérêt et de leur possible généralisation** : les travaux concernant ces applications doivent éventuellement concerner prioritairement :

- des **gisements très spécifiques et en quantité importante** (exemple : cendres sous foyer d'une papèterie X). Le programme VALOCENDRE lancé en 2015 s'inscrit dans cette stratégie.
- Les **cendres volantes** si possible. En effet, ces applications limitent la lixiviation des éléments, contrairement aux applications comme les techniques routières par exemple.

## **2.2.2 TRAVAILLER SUR LES POST-TRAITEMENTS, CONDITION NECESSAIRE POUR REPONDRE AUX EXIGENCES DES DEBOUCHES**

Contrairement au retour au sol ou les traitements nécessaires avant épandage sont relativement simples et pour lesquels on a un peu de retour d'expérience (broyage, criblage et deferraillage principalement), les débouchés alternatifs sont pénalisés par des contraintes de préparation plus fortes et moins éprouvées. La meilleure connaissance de ces traitements est donc une condition sine qua non pour pouvoir développer les voies de recyclage alternatives. On peut citer :

- Extinction de la chaux vive (la CaO est un facteur limitant dans de nombreuses solutions de valorisation),
- Essais de conditionnement des cendres avant épandage en forêt : criblage, broyage, humidification, granulation...,
- Elimination/valorisation de la matière organique « imbrûlée » (facteur limitant dans la valorisation en ciment, en bitumes)...
- Extraction d'ETM (démarches couteuses et tentatives déjà réalisées dans les années 2000),

## **2.2.3 FAIRE PRESSION POUR FAIRE EVOLUER LE CADRE REGLEMENTAIRE FAVORABLEMENT**

Pour la plupart des autres applications (Génie civil, BTP...), les porteurs de projets s'appuient sur des réglementations « par défaut » : celles concernant les cendres de charbon ou les mâchefers par exemple. La problématique cendres de biomasse n'était pas assez prégnante jusqu'à maintenant pour susciter la mise en place d'un cadre réglementaire ad hoc.

Une révision des réglementations existantes et le lancement de nouvelles lignes directrices pour l'utilisation des cendres de biomasse est nécessaire afin d'établir un cadre sécurisant sur le plan juridique pour les opérateurs et les utilisateurs de cendres et développer les filières émergentes.

La multiplication des programmes de R&D publics et privés démontrant l'intérêt potentiel de certaines applications (cimenterie, bétons, techniques routières, céramiques, traitement de déchets...) devrait, par le truchement des interprofessions notamment, faciliter l'évolution des textes. Les nombreux retours d'expériences des différents pays devraient être mieux compilés pour fournir une base pour l'établissement des directives européennes et de l'harmonisation des directives. Toutefois, les fortes

---

<sup>63</sup> Résidu de fumée incinération d'ordures ménagères

<sup>64</sup> Résidu de fumée d'incinération de déchets industriels spéciaux

incertitudes qui pèsent sur l'avenir de la plupart des débouchés étudiés ne sont pas de nature à débloquer la situation.

## **2.3 Structurer la filière et améliorer la connaissance**

La structuration de la filière doit permettre de mutualiser les efforts en vue de la valorisation des cendres et de promouvoir le développement de la filière. Elle pourrait passer par la création d'une plateforme collaborative, la communication (guide d'application), le partage et l'exploitation des données analytiques.

### **2.3.1 CREER UNE PLATEFORME COLLABORATIVE EN FRANCE**

Certains producteurs sont favorables à la mise en place d'une structure collaborative rassemblant producteurs et industriels et dédiée spécifiquement à la gestion des cendres de biomasse. L'objectif est de donner de la valeur ajoutée aux cendres et par conséquent à la filière bois énergie dans son ensemble. Cette structure pourrait notamment engager des réflexions sur les aspects logistiques (ex : plateformes de regroupement, de conditionnement).

Une coopération plus étroite entre les installations de forte puissance (CRE notamment), qui génèrent des flux importants et relativement stables en termes de composition, et d'autres industries (applications) est nécessaire pour développer, tester de nouvelles applications (ex : programmes mis en place par la papèterie de Golbey...).

Aujourd'hui ce rôle est assumé par le CIBE mais manque de structuration et de soutien.

- **Mettre en place une veille technologique et réglementaire**

Les groupes de travail cendres (GT BNAME -ex groupe du BNFERTI, GT du CIBE) réalisent cette veille mais elle est souvent axée sur des sujets spécifiques. Par ailleurs, les conflits d'intérêt qui existent entre les membres qui composent ces groupes (logique produit VS logique déchet, producteurs VS institutions, producteurs VS structures d'écoulement, exploitants VS exploitants, laboratoires VS producteurs, etc.) sont de nature à freiner les initiatives.

La veille technologique et réglementaire (objet de la présente étude) doit être portée par une structure indépendante.

Les programmes collaboratifs transfrontaliers permettent de mettre en commun les connaissances (BIOREFINE, ECOBIOGAZ...) mais ils sont implantés en dehors de frontières de l'hexagone.

### **2.3.2 COMMUNIQUER D'AVANTAGE SUR LES APPLICATIONS : PRODUCTION DE GUIDES SPECIFIQUES**

Les applications éprouvées, y compris pour des « marchés de niche » et des cendres très spécifiques doivent être promues pour améliorer la prise de conscience de la valeur des cendres de la biomasse pour des applications diverses. La confidentialité de certains programmes soutenus par des industriels ou des interprofessions limite finalement la portée des résultats et ralentit le développement des filières.

Concernant le retour au sol, la valeur fertilisante et neutralisante des cendres est très importante, ainsi que leur valeur « marchande » en engrais P, K et MgO et en chaux : ces atouts doivent davantage être communiqués aux utilisateurs ou à leurs prescripteurs.

Il est préconisé comme c'est fait pour les cendres de charbon ou les boues d'épuration des guides d'utilisation en fonction des usages.

Ces guides doivent être réalisés en collaboration avec les interprofessions (CIBE, CFC, cimentiers...), la chambre d'agriculture, l'UCFF...

Plusieurs guides réalisés par le CEREMA pour les applications en techniques routière sont parus en 2015 : ils concernent les laitiers, les déchets de déconstruction, les cendres volantes ou les mâchefers. Un guide pourrait être réalisé pour les cendres de biomasse sur ce modèle.

### **2.3.3 MIEUX CARACTERISER LES CENDRES ET MIEUX LES IDENTIFIER**

Malgré les nombreux programmes et études qui ont porté sur la caractérisation des cendres, force est de constater qu'il reste encore des paramètres et des aspects insuffisamment évalués. De plus, l'absence de typologie claire rend les données souvent peu ou pas exploitables.

Les acteurs sont ainsi assez unanimes pour faire le constat d'une caractérisation insuffisante, au moins pour certains paramètres, et d'une difficulté à définir les types de cendres et à les comparer entre elles.

### 2.3.3.1 Caractérisation

Les paramètres concernant le retour au sol sont assez bien connus : matière sèche, valeur fertilisante, valeur neutralisante, éléments-traces métalliques. Toutefois, certains paramètres mériteraient d'être affinés :

- Valeur neutralisante plus fréquente et plus précise.
- méthode d'extraction supplémentaire pour le Phosphore (P citrique, un acide organique plus représentatif que le phosphore soluble dans le citrate neutre).
- Disponibilité des éléments pour les cultures.

D'autres paramètres sont beaucoup moins analysés notamment car ils concernent des applications moins fréquentes :

- Disponibilité des éléments fertilisants,
- Incidence de l'extraction par voie humide sur la qualité des cendres (extinction de la chaux vive, carbonatation...),
- Comportement pouzzolanique, notamment pour les cendres de biomasse herbacées,
- Comportement à la lixiviation des cendres sous foyer,
- Densité,
- Particules fines (santé notamment),
- Indésirables : métaux, cailloux...
- Granulométrie, tailles des particules,
- Forme des particules,
- Formes de la chaux : CaO, Ca(OH)<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub>,
- Carbone organique total/imbrûlés.

### 2.3.3.2 Typologie

Les caractérisations sont nombreuses mais souvent difficiles à exploiter en raison des incertitudes sur le type de cendres concernées, liées à un manque d'informations sur :

- La ressource,
- Le type de cendres (sous foyer, en mélange ou non avec des cendres grossières, cendres volantes),
- Le mode d'extraction,
- Le type d'équipement : four à grille ou lit fluidisé,
- Les éventuels additifs : liants, chaux...

Il ressort de l'étude et des contacts une **véritable difficulté** pour **qualifier** les cendres entre elles : incertitudes très fréquentes sur le type de cendres : cendres sous foyers, cendres sous foyer et multi-cycloniques, cendres multi-cycloniques, cendres volantes, mélanges de toutes les cendres...

Il pourrait être pertinent de dresser une typologie simple des cendres admise par tous, et indiquant un minimum d'informations, qui permettrait de pouvoir comparer des analyses.

### 2.3.3.3 Création d'une base de données

L'étude a permis de collecter un certain nombre d'analyses qui pourront être la base d'une base de données :

- Analyses de cendres sous foyer de chaufferies biomasse : environ 200 analyses
- Analyses de cendres volantes : environ 10.
- Analyses de cendres sous foyer et volantes de lit fluidisé : environ 10.
- Comportement à la lixiviation de cendres volantes et sous foyer environ 20.

Des initiatives du même type sont portées notamment par le CIBE et le LDAR.

La base de données n'est exploitable que si chaque analyse est accompagnée d'informations permettant de qualifier les cendres : intrants, cendres sous foyer, type d'équipement....

## Conclusion

L'importance du gisement de cendres de biomasse en Europe et son augmentation attendue (plus de 3 million de tonnes) font émerger depuis 1 ou 2 ans de nouvelles démarches et initiatives pour trouver des alternatives au stockage des cendres en décharge, solution actuellement la plus répandue. Indépendamment des coûts de traitement, les capacités de stockage se réduisent en Europe et concernent de plus en plus des déchets dits « ultimes », non valorisables.

Contrairement à la filière charbon qui dispose d'un bon retour d'expérience et de filières de recyclage solidement implantées, la question de la valorisation des cendres de biomasse est plus récente et se pose avec acuité depuis seulement quelques années, avec le fort développement de la biomasse énergie, et la filière de recyclage des cendres manque donc de maturité.

En Europe, la voie de valorisation principale est le retour au sol sur parcelles agricoles (épandage direct, incorporation à des composts), mais d'autres modes de recyclage, moins ou peu développés, sont identifiés : retour au sol en forêt (Allemagne, Autriche), industrie du ciment et de la briquetterie, matériaux de remplissage pour les bitumes et bétons, aménagement de décharge (suède).

Insuffisamment anticipée dans un premier temps, la problématique liée à l'augmentation des flux de cendres de biomasse et à leur valorisation est désormais un sujet largement intégré dans de nombreuses initiatives et réflexions en Europe.

Ce constat est illustré par le lancement ces 2 ou 3 dernières années de programmes portant directement sur les cendres de biomasse (CERACENDRE, essais en forêt en France sous l'égide de l'UCFF, VALOCENDRE) ou de programmes plus généraux incluant un volet cendres (BIOCOMBUST, ECOBIOGAZ, BIOREFINE, Plateforme Phosphore...) ou par des essais « grandeur nature » réalisés sur de grosses installations industrielles (papetiers notamment). Plusieurs programmes d'envergure avaient été lancés quelques années auparavant et principalement BIOS Bioenergiesysteme, biomasscofiring et Värmeforsk Ash. Ces différentes démarches plus ou moins récentes confirment assez unanimement l'intérêt du retour au sol des cendres, y compris en forêt même si cette filière n'est toujours pas mise en œuvre en France.

Les démarches montrent par ailleurs de réelles opportunités pour des applications alternatives au retour au sol, notamment sur le modèle des cendres de charbon. Des développements prometteurs sont envisagés en cimenterie, céramique, stabilisation des sols, agrégats synthétiques, traitement de déchets... Toutefois, la plupart des résultats ne font pas émerger de solutions directement opérationnelles ni ne pouvant être développées de manière industrielle et massive en raison de contraintes techniques, réglementaires ou économiques à lever, ou au motif de préciser davantage l'incidence environnementale et/ou de confirmer certains premiers essais prometteurs. L'industrie de la céramique semble ouvrir des perspectives concrètes pour les cendres sous foyer, bien que cette filière soit explorée depuis de nombreuses années.

Les cendres volantes, généralement plus concentrées en polluants, pâtissent d'une image assez négative comparativement aux cendres sous foyer, et sont davantage enfouies en décharge.

Concernant le retour au sol, principale voie de valorisation actuellement mise en œuvre, le cadre réglementaire et normatif devrait à court terme davantage intégrer les cendres de biomasse, permettant d'envisager un recyclage plus massif des cendres et un recours à l'enfouissement moins généralisé.

S'agissant des autres modes de valorisation, les différentes réglementations et cadres normatifs concernent quasi exclusivement les cendres de charbon, et dont les applications en construction principalement et en techniques routières sont maîtrisées.

Afin de surmonter les obstacles techniques, environnement et réglementaires qui freinent le développement des modes de valorisation alternatifs, des améliorations sont attendues et nécessaires dans la connaissance de la qualité des cendres et leur stabilité, les techniques de post traitement (extinction de la chaux vive, élimination des imbrûlés, élimination des mâchefers...), dans la prise en compte plus systématique de la spécificité des cendres de biomasse dans les réglementations et cadres normatifs et la nécessaire harmonisation de la législation et des lignes directrices au niveau européen, dans la nécessité d'un partenariat plus actif entre producteurs, utilisateurs et organismes de recherche (plateforme collaborative) et dans une meilleure communication des travaux et des usages (guides d'utilisation).

# Annexes

## 1 Principaux contacts

- M. BORTOLLOTTI (Golbey/VALOCENDRE/PLASTICENDRE/Homologation pour retour au sol)
- L. FILHOL (SCF /Ceracendre)
- P. KRUSPAN (HOLCIM/Biocombust)
- G. TROUVE (Université de Haute Alsace/Biocombust)
- F. LETEURTRE (ADEME)
- C. NAYE (KOGEBAN CRE)
- D. POULIN (IRDA) Contact mail uniquement
- D. PORCU (OTV – Incinération de boues d'épuration)
- JP. TACHET (CIBE)
- JL. GADOIS (Biocombustibles SAS)
- C. BIERWALD (SEDE)
- L. DUFOUR (agriculteur)
- C. VIEUXBLED (agriculteur)
- C. PASCUAL (COFELY)
- C. RANTIEN (ADEME / retour des cendres en forêt)
- V. DESENCLOS (IDEX)
- V. HAUCHARD (CODAH)
- T. HUON (DALKIA)
- JL GADOIS (BIOCOMBUSTIBLES SAS)
- J. LECAPITAINE (Laboratoire Franck DUNCOMBE)
- J. MORET (IDEX)
- C. RIRCHTER (ONF)
- P. FUENTE-TOMAI (UCFF)
- S. ALEXANDRE (Déléguée interministérielle MEDDE)
- C. BRUYERE (VERI)

## 2 Principaux types d'équipements de combustion pour la biomasse

Les principaux équipements de combustion de la biomasse sont :

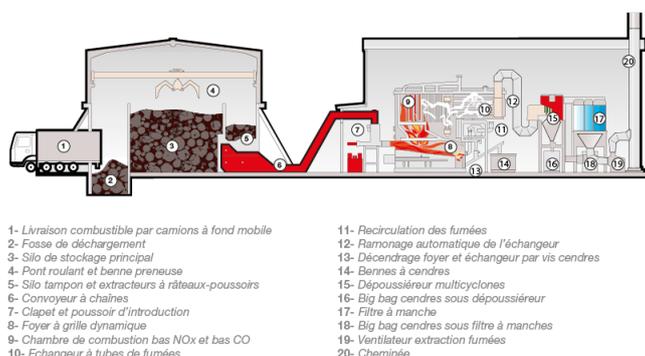
- Les fours à grilles
- Les fours à lit fluidisé
- Les spreader stockers.

La proportion de cendres sous foyer et volantes est différente selon les équipements (cf. volet 2).

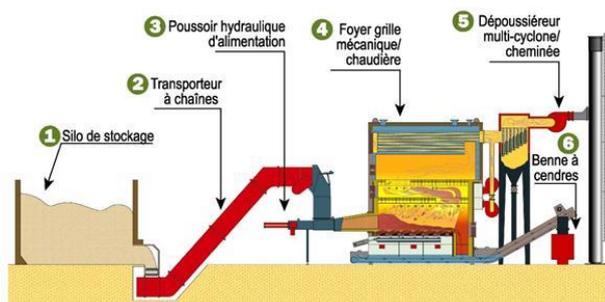
### 2.1 Les fours à grilles mobile

Dans les fours à grille, les déchets avancent dans le foyer du four sur une grille mobile au travers de laquelle circule l'air nécessaire à la combustion. C'est le four le plus répandu. Cette technique ne fonctionne correctement qu'avec des déchets ou des mélanges de déchets dont le PCI moyen est compris en 8 et 12 MJ/kg. Contrairement aux systèmes à lit fluidisé, le système sur grille lui tolère une hétérogénéité de granulométrie plus importante mais une plage de PCI moins large. Ces équipements génèrent majoritairement des cendres sous grilles.

**Tableau 39 : Chaufferie supérieure à 2 MW. Foyer à grille – Exemple de séparation des cendres sous foyer et des cendres du dépoussiéreur multi-cyclonique (source<sup>65</sup>)**



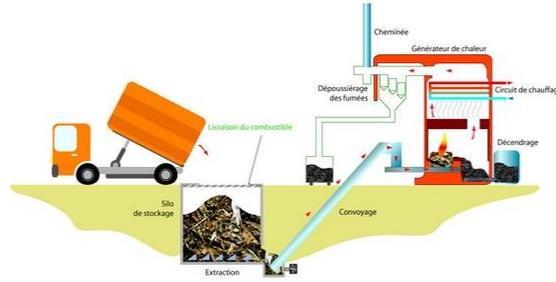
**Tableau 40 : Chaufferie inférieure à 2 MW. Foyer à grille – mélange des cendres sous foyer et des cendres du dépoussiéreur multi-cyclonique (source<sup>66</sup>)**



<sup>65</sup> <http://saint-denis.reseau-chaaleur.fr/le-reseau-du-smirec/la-chaufferie-biomasse-de-stains/>

<sup>66</sup> [http://www.boisenergie.guidenr.fr/l\\_schema-principe-chaufferie-bois.php](http://www.boisenergie.guidenr.fr/l_schema-principe-chaufferie-bois.php)

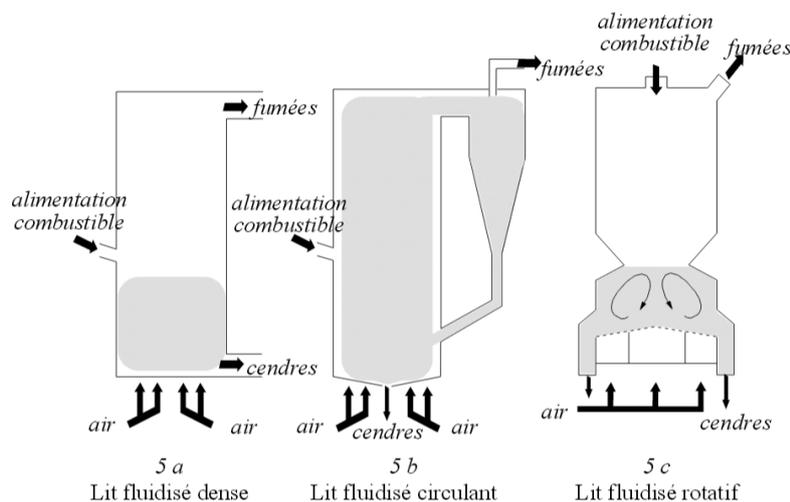
**Tableau 41 : Chaufferie inférieure à 2 MW. Foyer à grille – séparation des cendres sous foyer et des cendres du dépoussiéreur multi-cyclonique (source<sup>67</sup>)**



## 2.2 Les fours à lit fluidisé

Le principe consiste à faire brûler la biomasse sur un lit de matériaux mis en suspension par injection d'air. Ces équipements produisent principalement des cendres volantes. La combustion sur lit fluidisé permet d'utiliser des déchets ayant une gamme très large de PCI (de 6,5 à 29MJ/kg environ) car les déchets sont en suspension et le lit de sable est très peu sensible aux variations de chaleur dues aux déchets.

**Tableau 42 : Les trois principaux types de four à lit fluidisé**



## 2.3 Les spreader stockers.

Le spreader stoker est un système de combustion utilisé dans les chaudières et fours industriels fonctionnant aux combustibles solides. Certaines industries l'utilisent aussi pour valoriser leurs déchets comme dans l'industrie papetière, les sucreries ou encore l'industrie du panneau de bois aggloméré qui ont des déchets végétaux.

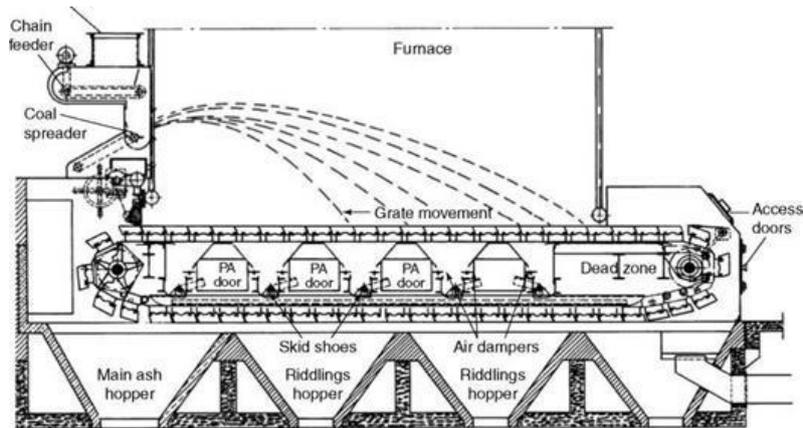
Le spreader-stoker est constitué :

- d'un système d'alimentation et de dosage du combustible
- d'un système de projection du combustible dans la chambre de combustion qui peut fonctionner sur 2 principes différents : soit une projection mécanique utilisée pour les charbons, tourbes et lignites (des pales rotatives sont utilisées pour projeter le combustible dans la chambre de combustion), soit une projection pneumatique utilisée pour les combustibles d'origine végétale (le combustible est alors soufflé dans la chambre de combustion).
- d'une grille de combustion qui retient le combustible en fin de combustion et évacue les cendres.

Les ratios cendres sous grilles/cendres volantes sont très variables.

<sup>67</sup> <http://www.sde03.fr/missions/energie/bois-energie/>

Tableau 43 : Spreader stocker<sup>68</sup>



### 3 Photos

Stockage tampon (case) de cendres sous foyer sur le site d'une installation de cogénération avec four à grille. Photo CEDEN



Stockage tampon (big-bag) de cendres volantes sur le site d'une installation de cogénération avec four à grille. Photo CEDEN



<sup>68</sup> Source <http://gazogenerator.com/boilers-for-power-and-process/spreader-burning>

Stockage tampon de cendres grossières sur le site d'une installation de cogénération avec four à grille et rondins de bois pour l'alimentation. Photo CEDEN

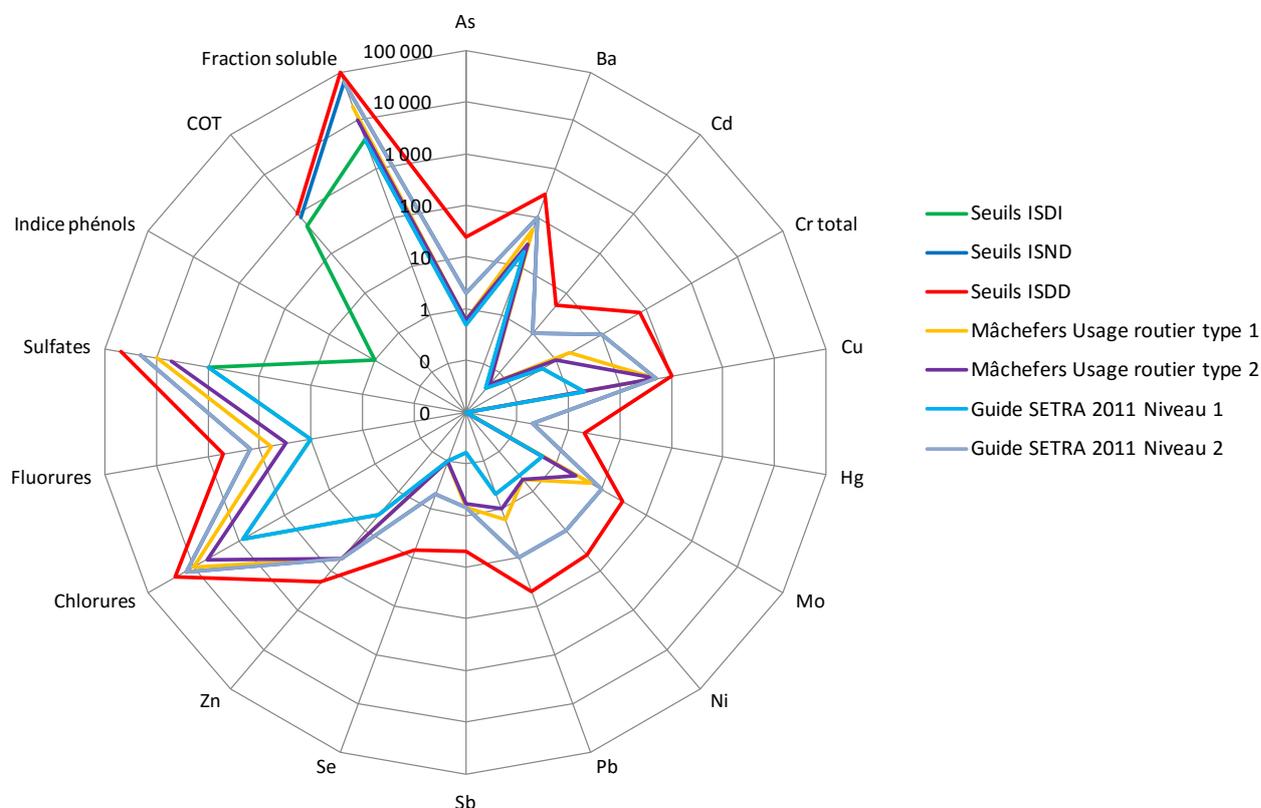


Stockage de cendres sous foyer de chaufferies collectives sur un site de regroupement rangé sous la rubrique ICPE 2716. Photo CEDEN



## 4 Seuils de comportement à la lixiviation en fonction des usages en France

Tableau 44 : Comportement à la lixiviation. Seuils imposés en fonction des usages et exutoires. mg/kgMS en Base log. CEDEN



## 5 Détail des programmes principaux

### 5.1 BIOCOMBUST (résultats avril 2015)

BIOCOMBUST est un projet de recherche interdisciplinaire impliquant des partenaires français, suisses et allemands en partenariat avec HOLCIM (2013-2015). Son but est d'étudier les émissions de particules et les cendres produites lors de la combustion de bois, de copeaux de bois et de granulés, l'impact de cette pollution atmosphérique sur la santé humaine et les opportunités de valorisation des cendres.

Le potentiel de valorisation des cendres de biomasse comme additif de ciment a été étudié. Dans le cadre du projet, différents types de cendres ont été testés à partir des divers dispositifs de récupération des cendres de combustion, comme les cyclones, des électrofiltres et les filtres à manches et sous les grilles. En outre, différents types de combustibles de biomasse ont été comparés.

Deux installations allemandes de combustion de biomasse et cinq françaises ont été sélectionnées pour le projet. Les installations se trouvent à ammertzwiller (F) 0.4 MW, St. Peter (d) 1.7 MW, Freiburg (d) 2.3 MW, Rixheim (F) 2.8 MW, Colmar (F) 8 MW, Illberg à Mulhouse (F) 4 MW et 8 MW et Saint-Louis (F) 17.3 MW.

Les résultats de l'étude ont font l'objet d'une présentation le **23 avril 2015 à Strasbourg**.

**L'utilisation des cendres de biomasse n'est possible que pour certaines applications spécifiques (marchés de niche) et entraine une vraie plus-value au produit final (effets « spéciaux » recherchés pour certains ciments). Pour certaines applications, la présence de chaux vive est même une condition nécessaire. Le broyage des cendres avant incorporation au ciment est indispensable. L'incorporation doit être de 15 % maximum pour ces applications.**

Les résultats présentés en avril 2015 confirment l'intérêt de certaines cendres :

- **Cendres volantes**

« Les mélanges avec un pourcentage de 30 % de cendres de combustion de biomasse donnent de mauvais résultats au niveau de la teneur en eau et de la résistance mécanique pour toutes les cendres volantes d'électrofiltre. Il en est de même pour les filtres à manches. Toutefois, les résultats avec de la biomasse brûlée avec du calcaire ajouté (foyer à lit fluidisé) sont en revanche améliorés. À un pourcentage de 30 % de cendres, les résultats sont satisfaisants ».

- **Cendres issues de Miscanthus provenant de multicyclone**

« L'usage des cendres provenant de multicyclone est tout à fait positif, même meilleur que les mélanges de référence établis avec des cendres de schiste bitumeux et de calcaire ».

- **Conclusion**

« Le potentiel d'utilisation des cendres comme matériau à mélanger au ciment semble entre autres dépendre de **l'adjonction de calcaire ou d'hydroxyde de calcium au combustible pour le miscanthus et de la technique d'extraction des fumées qui est utilisée** ».

Les images de microscopie électronique ci-dessous montrent que les cendres de multicyclones ont un fort potentiel d'utilisation. La comparaison de la morphologie des particules issues de la combustion de biomasse et piégées dans un multicyclone avec celle des cendres volantes issues de la combustion de charbon, qui sont déjà utilisées avec succès comme additif dans le ciment, montre des similitudes, laissant présager **un effet similaire** ».

- **L'avis de Holcim**

Selon Peter Kruspan<sup>69</sup> (HOLCIM) les principaux enseignements à retenir sont les suivants :

- Le facteur limitant principal est le COT, en quantité trop importante dans les cendres de biomasse en raison d'une température de fusion trop faible compte tenu de la taille en général modeste des installations (comparativement à des centrales thermiques à charbon). Les COT rendent inefficaces les autres additifs du ciment et sont donc proscrits.
- Les autres paramètres observés de près sont :
  - La minéralogie dont les phases amorphes (notamment C2S) est importante.
  - Les éléments solubles dont les sulfates en milieu alcalin
  - Les formes libres du calcium (CaO, Ca(OH)<sub>2</sub>...)
  - La granulométrie (aspects physiques). Selon Peter KRUSPAN, ce critère est aussi important que l'effet pouzzolanique et est pourtant négligé dans les normes. Les cendres de bois ont une porosité plus élevée que les cendres de charbon.
- La variabilité de la composition des cendres est importante pour une même installation, au cours de l'année (ex : analyses de 30 échantillons issus d'une même installation pendant un hiver).
- L'incorporation de cendres dans le cru avant cuisson n'est pas intéressant compte tenu de très faible pouvoir énergétique des cendres (très peu de matières organique).
- Le Cadmium, le Zinc et les chlorures doivent respecter des teneurs maximales.
- Tous les types de cendres (sous foyer, volantes) sont potentiellement utilisables.

En conclusion, certaines des cendres volantes étudiées peuvent être utilisées comme additifs au clinker de ciment mais leur variabilité est un frein à cette utilisation. Par ailleurs, l'incorporation dans des ciments de masse semble exclue en raison notamment de la présence de chaux vive.

## **5.2 CERACENDRE (Résultats début 2015)**

Le projet CERACENDRE, soutenu par l'ADEME et porté par le SFC a débuté en 2011 s'est terminé en décembre 2014. Il visait à étudier l'opportunité d'incorporer des cendres de biomasse dans des céramiques.

Les cendres utilisées étaient produites par une quarantaine d'installations, plutôt industrielles dans un premier temps (industrie du bois) et collectives par la suite, avec la coopération des exploitants (IDEX, DALKIA et COFELY).

Un premier travail de recherche a montré l'intérêt de leurs propriétés physico-chimiques quand elles interviennent dans la composition des céramiques fabriquées par voie sèche (25 % du secteur). La résistance mécanique des produits est augmentée et les températures de cuisson abaissées

---

<sup>69</sup> Communication personnelle Peter Kruspan (HOLCIM) en mars 2015.

Selon le responsable du programme<sup>70</sup>, les conclusions sont probantes et l'utilisation est possible sous réserve d'un certain nombre de traitements préalables (broyage, déferrailage, criblage).

L'utilisation est privilégiée en terres cuites (tuiles) à la faveur du process de leur fabrication qui implique l'extrusion, procédé faiblement consommateur d'eau (20 % d'eau maximum).

Les cendres adaptées sont les cendres sous foyer, les cendres volantes étant trop peu denses et trop fines.

Les autres types de fabrication de céramiques exigent une mise en suspension dans l'eau. Les alcalins contenus dans les cendres (Na, K, CaO) perturbent la rhéologie en milieu aqueux. En présence d'eau, la chaux vive (CaO) s'hydrate pour former des agrégats (Ca(OH)<sub>2</sub>, perturbant le process.

Pour ouvrir la voie aux procédés par suspension (sanitaire...), plusieurs solutions sont envisagées comme l'hydratation préalable de la cendre (formation de chaux éteinte Ca(OH)<sub>2</sub>), ou leur traitement à haute température (à haute température, les réactions entre la chaux et la silice aboutissent à matières inertes et réfractaires (wollastonite (CaSiO<sub>3</sub>) et anorthite (CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)), intéressantes pour la production de céramique.

Ainsi traitées, les cendres pourraient être valorisées y compris dans les procédés en voie aqueuse. Toutefois, ces développements feront l'objet d'un nouveau programme (acté) dans le prolongement du précédent, en partenariat notamment avec CYLERGIE et IDEX. Les travaux porteront également sur les conditions permettant d'utiliser des cendres volantes, d'étudier plus avant les possibilités de modification de la granulométrie.

L'incorporation de cendres de biomasse est intéressante à plusieurs titres pour la filière céramique :

- Substitution d'une matière première onéreuse (de 20 €/t pour les terres cuites à 70-80 €/t pour les autres céramiques et notamment le secteur sanitaire)
- Coûts de transport réduits : les gisements de cendres des chaufferies bois sont très diffus sur le territoire, à l'image de filière céramique

La céramique représente un marché de 5 millions de tonnes, dont 4 millions de tonnes de terres cuites (tuiles et briques). La substitution de 5 % du tonnage de terres cuites, nécessiterait de mobiliser **220 000 à 250 000 tonnes de cendres** compte tenu de leur teneur en eau.

La valorisation en céramique présente plusieurs atouts :

- L'industrie est diffuse sur le territoire français. Si les besoins sont importants à l'échelle nationale, ils sont diffus et donc peu importants par site. Il y a donc une adéquation avec le caractère diffus des chaufferies et donc des gisements de cendres.
- D'un point de vue environnemental, la valorisation en céramique permet de piéger les éléments indésirables (métaux) au travers d'un processus de vitrification (stabilisation au sens de la réglementation sur les déchets) et de les diluer au travers la production d'éléments de petite taille (exemple : sanitaire) et répartis partout dans le monde. Il n'y pas un phénomène de concentration comme dans le cas des techniques routières ou dans la production de béton.

### 5.3 PLASTICENDRE

Le projet Plasticendre est un projet français débuté en 2012 visant à mettre en place une nouvelle filière de valorisation pour les cendres volantes produites par une papèterie qui produit du papier à partir de papiers recyclés et des bois de trituration. Cette filière doit permettre la prise en charge d'une grande quantité de cendres mais elle doit en plus être stable et pérenne. Ce projet prévoyait l'utilisation des cendres volantes dans l'industrie de la plasturgie en tant que charge minérale. Actuellement, les charges couramment utilisées sont le talc et le carbonate de calcium.

Les cendres volantes de la papèterie présentent les mêmes caractéristiques que les charges conventionnelles, c'est pourquoi des études de faisabilité ont été menées. Ces études ont montré que les cendres peuvent parfaitement être utilisées en Plasturgie. Elles améliorent les propriétés rhéologiques du plastique permettant un gain de temps en production (moulage, injection, etc.) et donc financier mais cela permet également de faciliter le recyclage des plastiques. Ces résultats ont fait l'objet d'un premier dépôt de Brevet.

Les industriels de la plasturgie sont intéressés mais exigent un certain nombre de conditions. En effet, les charges minérales utilisées en plasturgie doivent déjà répondre à des critères : les cendres étant un déchet, l'industrie exige que ces cendres soient conformes à d'autres normes environnementales plus strictes. Ainsi, les cendres doivent satisfaire aux exigences suivantes :

---

<sup>70</sup> Communication personnelle M. Filhol de SFC en mars 2015.

- Pas de substances CMR (matières cancérigènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction) 1&2 figurant à l'annexe VI du règlement n°1272/2008 relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et préparations. Seuls certains métaux présents dans les cendres figurent dans cette liste mais à des concentrations faibles.
- Pas de substances qui ne sont pas (pré)enregistrées à l'ECHA (European Chemical Agency) conformément à la réglementation REACH. Par principe, les cendres volantes de la papèterie ont été enregistrées bien qu'ayant un statut de déchet et n'étant donc pas concernées par REACH.
- Pas de substances hautement prioritaires (SVHC/ substance of very high concern) publiées sur la liste « candidate » par l'ECHA. Plusieurs dizaines de substances inscrites sont susceptibles d'être présentes dans les cendres.
- Pas de substances interdites par les règles et critères du label allemand GuT (GemeinschaftUmweilfreundlicher Teppichboden) pour les moquettes écologiques. Les seuils de lixiviation imposés par le GUT sont respectés par les cendres volantes.
- Pas de substances interdites par les règles et critères du Blau Engel<sup>71</sup>.

Globalement, le programme PLASTICENDRE a montré que la plupart des critères exigés par l'industrie de la plasturgie étaient respectés mais qu'un certain nombre d'analyses étaient encore nécessaires.

#### 5.4 VALOCENDRE (début du programme premier semestre 2015)

Le projet VALOCENDRE<sup>72</sup>, d'une durée de 30 mois va débiter au premier semestre 2015. Il est porté par un consortium piloté par Norske Skog Golbey (papèterie à base de papier recyclé) dans le cadre d'un appel à projet BIP. Un utilisateur de bétons pour des applications spécifiques fait partie du consortium.

Contrairement au programme CERACENDRE qui portait principalement sur des cendres sous foyer, seules les cendres volantes de l'industriel seront concernées (55 000 tonnes).

Plusieurs verrous doivent être levés dans le cadre de ce programme et principalement celui consistant à éteindre la chaux vive. Il ne semble pas, au vu des premiers tests qui ont eu lieu par le passé sur les cendres du papetier, que les chlorures soient un frein à l'incorporation dans les bétons.

- Techniques routières

Certaines cendres sont déjà utilisées en techniques routières (ex : cendres grossières issues d'installations équipées d'un four à lit fluidisé.) Certaines cendres volantes, non valorisables directement en techniques routières (inadéquation avec les seuils imposés par les réglementations) bénéficient d'une autorisation provisoire pour le traitement des sols pour techniques routières. L'industriel souhaitait obtenir une autorisation définitive pour des applications plus larges en techniques routières, afin de valoriser davantage de cendres volantes selon cette voie.

En technique routière, les cendres peuvent être utilisées de différentes manières<sup>73</sup> :

- dans un mélange Sols + cendres
- dans un mélange Sols + cendres + liant hydraulique routier (LHR)
- cendres humidifiées seules
- cendres humidifiées + LHR
- dans un mélange Grave naturelle ou recyclée + cendres
- dans un mélange Grave naturelle ou recyclée + cendres + LHR
- comme constituant de Matériaux auto-compactant
- comme constituant de Liant hydraulique routier (LHR)

L'industriel NORSKE SKOG a entrepris en 2012-2013 des essais à grande échelle (6 000 tonnes de cendres volantes (de filtres à manche issues d'un four à lit fluidisé) en partenariat avec un industriel du BTP. L'objectif était de valider le procédé de mise en œuvre, vérifier les performances mécaniques du produit et pouvoir faire des mesures environnementales.

Les résultats des tests de lixiviation ont été particulièrement probants, pour l'ensemble des étapes simulées de la vie de l'ouvrage (avant, en fonctionnement, après démolition). Toutefois, les tests ont

<sup>71</sup> Géré par l'Agence fédérale de l'Environnement (Allemagne), le label est décerné attribué à des produits qui, tout en ayant une démarche de réduction des effets néfastes de leur production sur l'environnement, peuvent être considérés comme aussi fiables, qualitatifs et sécurisés que les autres.

<sup>72</sup> Communication personnelle Mme BORTOLOTTI Norske Skog en mars 2015.

<sup>73</sup> VALDENNAIRE B. Positionnement des cendres volantes de NSG par rapport à la réglementation pour plusieurs filières de valorisation. Université de Lorraine. 2013

été réalisés sur des cendres en mélange avec un liant hydraulique routier (le mélange obtenu est le matériau finalement utilisé en techniques routières) : or il semble que les tests doivent porter sur les cendres seules, ce qui rend le respect des seuils plus difficile à atteindre.

#### **5.5 UCFF/ADEME. Etude sur la valorisation des cendres de biomasse en forêt 2011-2013. (résultats mars 2014)**

Selon l'étude réalisée par l'ADEME et publiée en mars 2014, les cendres de bois sont composées de carbonates de calcium, d'oxyde de calcium, de potassium et de sodium. Les carbonates et oxydes ont un effet de chaulage très fort et peuvent servir à remonter le pH d'un sol acide. Cependant, il faudrait épandre dans certains cas jusqu'à **20 tonnes de cendres à l'hectare** pour remonter le pH d'un point. L'épandage de cendres garde tout son sens lorsqu'il est réalisé sur les sols acides, organiques et minéraux carencés en calcium, magnésium, potassium et phosphore.

Quelques préconisations sont proposées suite à la réalisation des chantiers d'épandage et de granulation dans le cadre du programme :

- **Chantiers de démonstration**

- Eteindre la chaux vive des cendres sèches en les humidifiant. Cela peut représenter un risque réel pour la sécurité et un risque d'incendie.
- Le site de stockage de cendre doit être propre, c'est-à-dire, sans éléments qui peuvent endommager l'épandeur (pierres, ferrailles et autres éléments désirables, etc.).
- Il est absolument nécessaire de prendre des mesures de sécurité pour la manipulation des cendres : masque, lunettes, gants, casque, bottes, etc. Il est préférable que la cabine soit fermée.
- Les épandeurs agricoles ne sont pas adaptés aux sols forestiers, notamment quand ceux-ci ont été préparés (passage du cover-crop). Il est préférable d'utiliser du matériel forestier ou à défaut d'équiper l'épandeur avec des roues forestières.

- **Les essais de granulation**

Divers essais de granulation ont été réalisés à partir de cendres issus de chaudières biomasse, au bois principalement, dans le domaine de l'industrie. Les granulés de cendres ont été produits à partir de filières de granulation qui produisent actuellement des pellets de bois ou des agro-pellets sur le site LUZEAL. Ces tests ont permis de voir l'adaptation de ce type de matériel à la production de granulés de cendres. Les essais ont montré l'impossibilité de granuler sans un liant. Les liants testés étaient de la farine de pulpe de raisin, du marc de raisin et de l'huile de colza. Compte tenu de l'apport de liant organique, les granulés contiennent environ 50 % de matière organique sur produit brut, et peuvent être considérés comme des organo-minéraux.

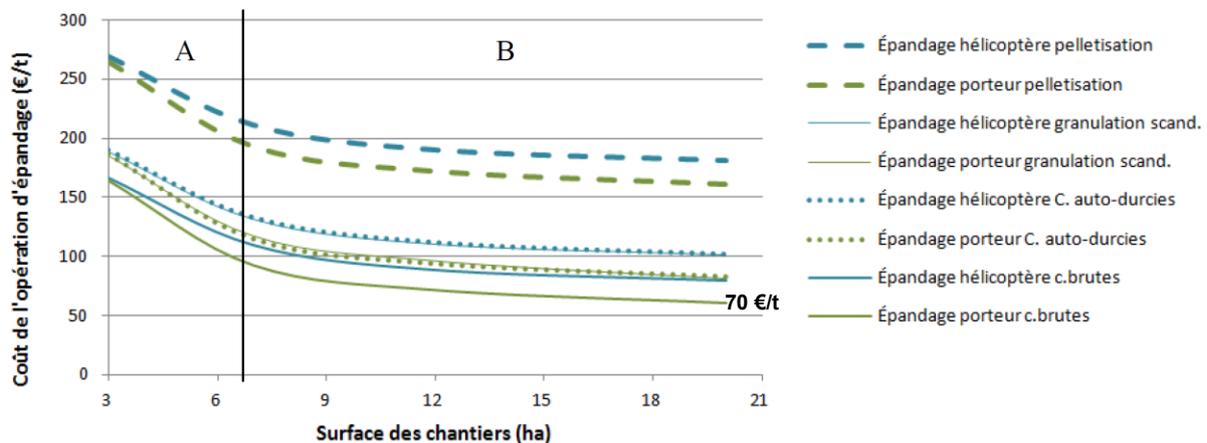
Les granulés obtenus, bien que riches en matière organique, ne répondent pas à la norme NF U 44 051 car les teneurs en éléments fertilisants sont trop importantes. En revanche, les granulés sont conformes aux exigences de la norme NF U42-001/A10, classe VI (a) « engrais organiques NPK, NP ou NK entièrement d'origine animal et/ou végétale » type engrais 12 « engrais organique NK », sous réserve de la possibilité d'avoir de l'huile comme intrant.

- **Coûts**

Les enseignements économiques des essais du programme UCFF/ADEME sont les suivants

- L'opération d'épandage de cendres brutes en forêt est rentable lorsqu'elle est faite avec un porteur forestier, que les cendres ne sont pas traitées, que les surfaces des chantiers sont supérieures ou égales à 20 ha et distantes de 10 km au maximum. Cela s'apparente aux chantiers au stade éclaircie qui pourraient être réalisés avec un porteur forestier.

**Tableau 45 : Influence de la taille des chantiers dans le coût de l'opération d'épandage de 120 t (source UCFF/ADEME 2014)**



- L'épandage de cendres brutes par hélicoptère est rentable pour certains scénarii mais pour des raisons environnementales semble peu faisable.
- L'épandage de cendres traitées (auto-durcissement et granulation scandinave) fait avec un porteur ou un hélicoptère est rentable seulement si des mesures de compensation existent (200€/ha) et dans des conditions bien définies. Il s'agit de chantiers de surfaces comprises entre 7 et 20ha (7-20ha pour le porteur, 12-20 pour l'hélicoptère) destinés soit à des coupes rases (7ha) soit à des éclaircies (12-20ha) distants jusqu'à 10km pour les éclaircies et jusqu'à 20km pour les coupes rases.
- Le coût du traitement de la granulation compactée (pelletisation) reste trop élevé pour être rentabilisé dans un épandage en forêt. Cependant, le fait de granuler des cendres mélangées à de la matière organique permet de créer un produit plus stable et de composition conforme à un engrais organique. Ces granulés pourraient être valorisés sur sols agricoles et se substituer aux engrais chimiques.

L'étude précise « En raison du caractère innovant de l'épandage de cendres en forêt, **des recherches complémentaires sont également à mener pour améliorer l'analyse économique d'un épandage de cendres en forêt et arriver à des résultats 100% français. L'opération peut s'avérer rentable** lorsqu'elle est faite par un porteur forestier, que les cendres ne sont pas traitées (auto-durcissement, granulation) et les surfaces des chantiers impliquées sont supérieures ou égales à 20 ha.

L'épandage de cendres pourrait être rentable s'il existait de **mesures de compensation** ou **si les conditions de la station permettaient une augmentation de la croissance des peuplements** dû à l'effet des cendres. Augmentation qui se traduirait en revenus supplémentaires pour le propriétaire et qui pourrait l'inciter à investir au départ pour compléter le financement de l'opération. De même, la bonne planification logistique (transport de cendres) ainsi que l'optimisation des journées de travail et la bonne calibration de la dimension des chantiers jouent un rôle fondamental dans le coût. »

L'étude montre que la rentabilité intervient à partir d'une surface de 20 ha et que la granulation (avec de la matière minérale ou organique) est une voie intéressante pour éviter les phénomènes de prise en masse ou les effets liés au caractère pulvérulent et corrosif des cendres.

Selon l'étude ADEME, les risques biologiques, agronomiques et écotoxicologiques associés à l'épandage de cendres méritent d'être mieux quantifiés à ce stade.

Ainsi, dans le prolongement de ces travaux, un **appel à projet REACTIF/RESPIRE**, qui débute en 2015 pour une durée de 3 ans, vise à évaluer l'incidence environnementale des épandages (le programme RECASH a déjà conduit des études sur cette problématique) et notamment le devenir des métaux lourds dans les sols, l'objectif étant à terme de faire évoluer favorablement la réglementation.